



Behovstyret ventilation til enfamiliehuse

Nielsen, Toke Rammer; Drivsholm, Christian; Hansen, Mads Peter Rudolph; Kragh, Jesper

Publication date:
2009

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Nielsen, T. R., Drivsholm, C., Hansen, M. P. R., & Kragh, J. (2009). *Behovstyret ventilation til enfamiliehuse*. DTU Byg, Danmarks Tekniske Universitet. DTU Byg-Rapport No. R-212

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Behovstyret ventilation til enfamiliehuse

Institut for Byggeri og Anlæg

Rapport 2009

Toke Rammer Nielsen
Christian Drivsholm
Mads Peter Rudolph Hansen
Jesper Kragh
DTU Byg-Rapport R-212 (DK)
ISBN= 9788778772909
12 2009

Forord

Nærværende rapport udgør rapportering for projektet "Udvikling af behovstyret ventilation til enfamiliehuse". Projektet er finansieret af PSO-midler gennem Dansk Energi Net, journalnr. 464-06, projektnr. 339-30.

Projektet er udført i samarbejde mellem Trend Control Systems A/S, Lindab A/S, EcoVent Aps, Teknologisk Institut og Danmarks Tekniske Universitet.

En særlig tak går til Thue Møller Jensen og hans familie som har stillet deres bolig til rådighed som forsøgshus for projektet.

Projektdeltagere:

Toke Rammer Nielsen, Danmarks Tekniske Universitet (Projektleder)

Jesper Kragh, Danmarks Tekniske Universitet

Martin Vraa Nielsen, Danmarks Tekniske Universitet

Christian Drivsholm, Teknologisk Institut

Hans Olsen, Teknologisk Institut

Mads Peter Rudolph Hansen, Teknologisk Institut

Niels Boel, Trend Control Systems A/S

Werner Andresen, Lindab A/S

John Steen Jensen, EcoVent Aps

December 2009

Danmarks Tekniske Universitet

Institut for Byggeri og Anlæg, DTU Byg

CVR-nr. 30 06 09 46

Indhold

Forord.....	3
Resume (Dansk)	7
Summary (English)	11
1 Indledning	15
2 Reguleringsstrategier for termisk indeklima.....	19
2.1.1 Referencehus	19
2.1.2 Simulering efter bygningsreglementets krav til udelufttilførelse til beboelsesrum	20
2.2 Oversigt over simuleringsanalyser	20
2.2.1 Ventilation med/uden bypass.....	20
2.2.2 Udluftning ved brug af vinduer	23
2.3 Konklusion vedr. termisk indeklima.....	23
3 Reguleringsstrategier for atmosfærisk indeklima.....	25
3.1 Simpel reguleringsstrategi	25
3.1.1 Grænseværdier for absolut fugtighed	25
3.1.2 Grænseværdier for CO ₂ -koncentration.....	25
3.1.3 Vurdering af ventilation ved simpel reguleringsstrategi.....	26
3.2 Avanceret reguleringsstrategi.....	32
4 Forsøgshus	33
4.1 Opstilling af forsøg	35
4.2 Måleudstyr	35
5 Simulering af reguleringsstrategier i forsøgshuset	37
5.1 Model af forsøgshus og brugsmønstre	37
5.1.1 Brugsmønstre lav belastning.....	39
5.1.2 Brugsmønstre høj belastning	41
5.2 Resultater med konstant ventilationsrate	44
5.3 Simpel reguleringsstrategi	46
5.4 Avanceret reguleringsstrategi.....	49
5.4.1 Betydning af åbne eller lukkede døre	49
6 Forhold i forsøgshuset før behovstyring.....	53
7 Forhold i forsøgshuset med simpel reguleringsstrategi	57
7.1 Indeklima.....	60
7.2 Diskussion af simpel reguleringsstrategi.....	62

8	Forhold i forsøgshuset med avanceret reguleringsstrategi	63
8.1	Betydning af setpunkt for CO ₂ -koncentration	64
8.2	Målinger med balancerede luftstrømme.....	69
8.3	Diskussion af avanceret reguleringsstrategi	75
9	Diskussion og sammenligning af reguleringsstrategier	77
10	Konklusion.....	81
11	Litteratur	83
	Bilag 1. Weekendbrugsmønstre anvendt ved simulering i IESVE	85
	Bilag 2. Pseudokode for reguleringsstrategi med regulering af setpunkt for konstanttrykregulering.	91

Resume (Dansk)

I dette projekt er undersøgt muligheden for behovsstyring af luftskiftet i en-familieboliger ved praktisk afprøvning af to forskellige strategier med udgangspunkt i helt basale krav:

- Der må ved normal (og korrekt) brug af boligen ikke kunne opstå fugttekniske problemer forårsaget af behovsstyringen
- Det atmosfæriske indeklima må ikke forringes ved behovsstyringen

I Bygningsreglement 2008, BR08, (EBST, 2008) kan behovsstyring af ventilationsluftmængden hvor luftmængden reduceres udenfor brugstiden som udgangspunkt tillades for kontorbyggeri, skoler, børnehaver, dagcentre, institutioner, fritidshjem m.fl. Undtaget er stadigvæk ventilation til boligbyggeri. Her stilles krav om en luftmængde på mindst 0,35 liter/s pr. m² opvarmet areal i alle døgnets 24 timer. Denne værdi svarer nogenlunde til et luftskifte på omkring 0,5 gange pr. time ved normal lofthøjde. Denne værdi er primært fremkommet ud fra en fugtteknisk betragtning.

I 2011 forventes et nyt bygningsreglement med basiskrav svarende til den nuværende energiramme i BR08 for *lavenergibyggeri klasse II*, og i 2015 forventes igen et nyt bygningsreglement med basiskrav svarende til den nuværende energiramme i BR08 for *lavenergibyggeri klasse I*.

I takt med denne stramning vil der på ventilationssiden kunne skabes følgende forbedringer:

- Ventilationsanlæggets specifikke elforbrug forbedres (reduktion i elforbrug)
- Ventilationsanlæggets varmegenvinding forbedres (reduktion i opvarmningsbehov)
- Behovsstyring af luftskiftet i boligen (reduktion i elforbrug og opvarmningsbehov)

Der sker løbende forbedringer på de to første punkter, men det sidste punkt er rent lovmæssigt låst fast. Det er dog ikke holdbart i længden med krav til et konstant luftskifte i døgnets 24 timer uanset det faktiske behov.

SBi har derfor i flere projekter undersøgt muligheden for behovsstyring af ventilationen i etagebyggeri vha. fugtsensorer. Resultaterne indikerer energisparepotentiale helt op til 25 % til 30 % af ventilationstab (Bergsøe, 2000; Bergsøe og Afshari, 2008).

I projektet er overordnet undersøgt 2 forskellige reguleringsstrategier: En relativ simpel og billig strategi, og en relativ avanceret og dyr strategi:

1. *Simple regulering*: Luftudskiftningen varierer ensartet for alle rum svarende til et gennemsnitligt luftskifte for hele boligen på enten 0,1 l/(s m²) eller 0,35 l/(s m²). Variationen i luftskifte styres af centrale ventilationsaggregatsensorer (relativ luftfugtighed, temperatur og CO₂) placeret i udsugningsluften og udeluften. Reguleringen foretages på baggrund af CO₂-koncentration og absolut fugtighed i både indblæsnings- og udsugningsluft. Registrering af en fast forskel i CO₂-koncentrationen mellem indblæsnings- og udsugningsluft aktiverer det høje trin. Når forskellen i CO₂-koncentrationen igen er under grænseværdien køres ned på det lave trin. Som supplement til CO₂-styringen måles forskellen i absolut fugtighed mellem indblæsnings- og udsugningsluft, for at sikre at ventilationen forbliver på det høje trin, såfremt der er en fugtproduktion når ingen er hjemme (evt. pga. tørring af tøj).

2. *Avanceret regulering:* Luftskiftningen varierer dynamisk for alle opholdsrum svarende til et gennemsnitligt luftskifte for hele boligen i intervallet 0,1 l/(s m²) til 0,35 l/(s m²). Variationen i luftskifte for de enkelte opholdsrum styres af CO₂-sensorer placeret i hvert opholdsrum og reguleringsspjæld i indblæsningssystemets tilslutningskanaler. Der er yderligere placeret sensorer for relativ luftfugtighed i de fugtbelastede rum som sikrer et gennemsnitlige luftskifte for hele boligen forceret til 0,5 gange pr. time hvis der er høj relativ fugtighed i et af de fugtbelastede rum.

Der er udført en række forsøg med disse to reguleringsstrategier i et nyere parcelhus fra 2002 med et opvarmet gulvareal på 140 m². Husets eksisterende ventilationssystem er modificeret for at muliggøre behovstyringen. Huset bebos af to voksne og to mindre børn. Begge voksne har arbejde i dagtimerne, hvor børnene passes udenfor huset. Forsøgene har fokuseret på indeklimaparametre (CO₂ og fugtighed) i boligens rum og funktionen af ventilationsanlægget. Der er ikke udført måling af elforbruget til ventilationsanlægget og pga. udfald i dataopsamlingen findes ikke præcise data for luftmængder.

De første målinger i forsøgshuset viste at det installerede ventilationsaggregat ikke leverede det krævede luftskifte og at det anvendte ventilationsaggregat var lidt for lille. Desuden var ventilationskanaler i det ventilerede loftrum ikke isolerede. Det oprindelige ventilationsaggregat blev udskiftet med et større aggregat fra Ecovent og indreguleret til at opfylde Bygningsreglementets krav. Ventilationskanaler i loftrummet blev isoleret. På alle tilslutningskanaler til opholdsrummene monteredes motorspjæld fra Lindab. Sensorer for temperatur, relativ fugtighed, CO₂ og tryk fra Trend blev monteret i kanalsystemet og boligens rum. Alle sensorer, motorspjæld og ventilatorer tilsluttedes en central reguleringsenhed fra Trend.

Resultaterne hvor boligen ventileres med konstant luftskifte som krævet i Bygningsreglementet viser at CO₂-koncentrationen og luftfugtigheden i boligen i hovedtræk holdes indenfor anbefalede grænser. I soveværelset registreres om natten dog ofte CO₂-koncentration over 1000 ppm, hvilket ofte anvendes som grænsen for acceptabel luftkvalitet. Dette skyldes høj belastning fra to sovende voksne og ofte også et barn. Desuden ses tydeligt, at boligen ikke bruges i dagtimerne på hverdage, hvor CO₂-koncentrationen i løbet af dagtimerne falder til nær udeluftens koncentration.

For den simple regulering er udført målinger for forskellige grænseværdier for forskel i CO₂-koncentration og forskel i absolut fugtighed. Den bedste funktion for den aktuelle bolig blev opnået med grænseværdier på 150 ppm for forskellen i CO₂-koncentration og 2 g/kg for absolut fugtighed. I dette tilfælde kørte ventilationen i 37 % af tiden på det lave trin. Der observeredes stadig for høje CO₂-koncentrationer i soveværelset, hvilket skyldes at den simple regulering ikke gav mulighed for forcering af luftmængden ud over kravet i Bygningsreglementet. Vurderet på CO₂-koncentrationen og luftfugtigheden konkluderes at den simple regulering ikke giver anledning til væsentlige forringelser af det atmosfæriske indeklima.

For den avancerede regulering er udført målinger med forskellige setpunkter for CO₂-koncentrationen i opholdsrummene og en svag forcering af luftmængden til soveværelset er mulig. Setpunkter på 500 ppm og 800 ppm er undersøgt. Med setpunkt på 500 ppm kører den avancerede regulering meget lig den simple regulering, da CO₂-koncentrationen pga. opblanding af luften i boligen i alle boligens opholdsrum hurtigt overstiger 500 ppm når der er personer i boligen, hvilket

medfører at alle spjæld åbner. Setpunktet for CO₂-koncentrationen i opholdsrummene på 800 ppm svarer til et ønske om en luftkvalitet lidt bedre end indeklimaklasse II, som anbefales som normalt niveau ifølge EN15251 (DS, 2007). Der er dog ingen garanti for at setpunktet kan holdes, da luftskiftet med undtagelse af soveværelset ikke kan forceres over det krævede luftskifte i Bygningsreglementet. Med setpunkt på 800 ppm viser resultaterne at med undtagelse af spjældene til stuen og soveværelset så forbliver spjældene til de øvrige opholdsrum lukkede næsten hele tiden, hvilket medfører et væsentligt lavere samlet luftskifte i boligen end ved den simple regulering. Pga. udfald i volumenstrømsmålingerne er det dog ikke til at sige hvor meget det reduceres. Dette medfører en forøgelse af CO₂-koncentrationen i visse opholdsrum i forhold til den simple regulering, men CO₂-koncentrationen holder sig under de ønskede 800 ppm. I børneværelserne ses at spjældene stort set altid er lukkede men åbner ganske kort i løbet af natten for at holde CO₂-koncentrationen under 800 ppm. Børneværelserne oplever således en lavere luftkvalitet end det var tilfældet med den konstante ventilation og den simple regulering. Luftkvaliteten i børneværelserne overholder dog kravene til indeklimaklasse II. Luftkvaliteten kan forbedres ved at sænke setpunktet for CO₂-koncentrationen, men det medfører at systemet opfører sig mere og mere som den simple regulering, som er væsentlig mere simpel og billig at implementere.

Den avancerede regulering giver mulighed for større energibesparelser end den simple regulering, da det samlede luftskifte i boligen reduceres. Den valgte reguleringsstrategi sikrer dog ikke at dette besparelspotentiale opnås mht. elforbruget, da den implementerede regulering holder et for højt tryk i kanalsystemet. Det er nødvendigt at udvikle reguleringsalgoritmen videre for at opnå det fulde besparelspotentiale.

Selvom de to forskellige strategier er implementeret og afprøvet i boligen over længere tid, kan kun den simple regulering anbefales på nuværende tidspunkt. Den simple regulering sikrer at luftkvaliteten i boligen er stort set den samme som ved en konstant ventilation. Desuden kræver den simple regulering "kun" to CO₂ sensorer, to relativ fugtighed sensorer og to temperatur sensorer, som dog alle skal checkes fx i forbindelse med filterskift. Styringen i lidt modificeret form anvendes i dag i møderum, kontorlokaler, institutioner etc.

Den avancerede styring rummer en del fordele sammenlignet med den simple regulering blandt andet muligheden for bedre fordeling af luften hvor der er brug for den. For at opnå et besparelspotentiale ud over den simple reguleringsstrategi medfører dette at luftmængden også reduceres i brugstiden. Dette vil medføre en diskussion om hvorvidt denne reguleringsform medfører en forringelse af indeklimaet og om denne forringelse er acceptabel. Der foreligger ikke tilstrækkelig viden om indeklimaets indflydelse på sundheden til at vi kan anbefale at luftskiftet reduceres betydeligt i brugstiden. Flere vurderinger i laboratoriet og huse er nødvendige for at den avancerede reguleringsstrategi kan anbefales.

Summary (English)

This project investigated the possibility of demand controlled ventilation in single-family homes by practical testing of two different strategies based on the most fundamental requirements:

- Problems caused by humidity should not occur when the building is used in a normal (and correct) way
- The indoor air quality should not be reduced as a result of the demand controlled ventilation

The Danish Building Regulations, BR08, (EBST, 2008) allows demand controlled ventilation with reduced air exchange outside time of use only for offices, schools, daycare institutions etc. For houses a ventilation rate of at least $0.35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ is required 24 hours per day. This ventilation rate is approximately equal to an air exchange rate of 0.5 times per hour at normal ceiling height and has mainly been decided based on the moisture production in the house.

It is expected that the base requirement for energy consumption in buildings in 2011 is changed to the level for low energy class II buildings and in 2015 is changed to the level for low energy class I buildings in the present Building Regulations (BR08).

To achieve these savings there are several improvements to consider concerning the ventilation:

- The specific fan power can be improved (reduces electricity consumption)
- The heat recovery can be improved (reduces heating demand)
- Demand controlled ventilation of the air change rate (reduces electricity consumption and heating demand)

The first two points are constantly improved, but the last point is for houses still not possible caused by the regulations. It is not optimal to maintain this in the future and just have a constant ventilation rate without considering the actual need for ventilation.

The Danish Building Research Institute have in several projects investigated options for demand controlled ventilation in multi-family houses based on humidity sensors. Their results indicate energy savings up to 25 % to 30 % of the ventilation heat loss (Bergsøe, 2000; Bergsøe and Afshari, 2008).

This project investigated two different control strategies: A simple and cheap strategy and an advanced and expensive strategy:

1. *Simple control:* The ventilation rate is varied only on the whole building level giving an average ventilation rate of either $0.1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ or $0.35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. The air change rate is controlled by sensors in the air handling unit measuring relative humidity, temperature and CO_2 . The control is based on the CO_2 -concentration and absolute humidity in the supply air and exhaust air. A fixed set point for the difference in CO_2 -concentration between the exhaust and supply is used to decide if the ventilation rate is low or high. As supplement to the CO_2 control the difference in absolute humidity between exhaust and supply is used to assure that the ventilation remain at the high level if there is a high level of humidity in the house.

2. *Advanced control:* The air change rate is varied dynamically for all living rooms giving an average air change for the house between $0.1 \text{ l}/(\text{s m}^2)$ and $0.35 \text{ l}/(\text{s m}^2)$. The air change rate in the living rooms is controlled by CO_2 -sensors in each room and dampers in the room supply duct. Relative humidity is measured in the rooms with high moisture production to ensure that the highest air exchange is activated if the relative humidity in one of these rooms is too high.

Measurements have been performed in a new single family house from 2002 with a floor area of 140 m^2 . The existing ventilation system in the house has been modified to support demand controlled ventilation. The house is occupied by two adults and two young children. Both adults have work outside the house during the daytime where also the children are in daycare or school. The measurements focused on the air quality (CO_2 and humidity) in the living rooms and on the function of the ventilation system. The electric power consumption is not measured and as a result of errors in the logging of air flow, precise data for air flow in the system are not available.

The first measurements in the house showed that the existing air handling unit was too small and did not deliver the required air change rate. Also the ventilation ducts in the unheated attic space were uninsulated. The air handling unit was exchanged by a larger unit from Ecovent and was balanced to meet the present requirements. The ventilation ducts in the attic were insulated. All supply ducts to the living rooms were fitted with motor controlled dampers from Lindab. Sensors for temperature, relative humidity, CO_2 and pressure from Trend were mounted in the duct system and rooms. All sensors and dampers were connected to a central control unit from Trend.

The results for constant ventilation as required in the Building Regulations showed that the CO_2 -concentration and the moisture level in the house generally is within the required limits. At night CO_2 -concentrations above 1000 ppm were often observed in the bedroom. 1000 ppm is typically used as a limit for the CO_2 -concentration for acceptable air quality. This is a result of high people load in the bedroom with two sleeping adults and often also one child. During daytime the house is unoccupied and the CO_2 -concentration drops to values close to the outdoor concentration.

The simple control was tested for several values of difference in CO_2 -concentration and difference in absolute humidity. The best results were reached with a 150 ppm limit on difference in CO_2 -concentration and 2 g/kg limit on difference in absolute humidity. In this case, the ventilation was running with the low ventilation rate 37 % of the time. Still too high CO_2 -concentration was observed in the bedroom which is caused by the fact, that the ventilation rate cannot exceed the rate required in the Building Regulations. Evaluated based on CO_2 -concentration and humidity, the simple control does not result in significant changes in the air quality compared to a constant ventilation rate.

The advanced control has been tested for different set points for CO_2 -concentration in the living rooms and the ventilation rate in the bedroom can be increased slightly. Set points for CO_2 -concentration of 500 ppm and 800 ppm were investigated. When the set point for CO_2 -concentration was 500 ppm the advanced control functioned almost as the simple control because the CO_2 -concentration in all rooms quickly exceed 500 ppm when the house is occupied as a result of air mixing between rooms. The set point of 800 ppm for the CO_2 -concentration was chosen based on achieving an air quality slightly better than Class II, which is recommended as normal level of quality in EN15251 (DS, 2007). There is no guarantee that this level is reached because the air change rate

has an upper limit. Results for setpoint 800 ppm showed that besides the damper to the bedroom and the living room, all other dampers are kept in the closed position most of the time. This results in a lower average air change rate in the house compared to the simple control. It is not possible to show the precise change in air flow due to errors in the measurements. The result is an increased CO₂-concentration in some rooms compared to the simple control, but the CO₂-concentration is generally kept below 800 ppm. The dampers to the children's bedrooms were closed almost all the time but opens for a very short period of time during the night to maintain a CO₂-concentration below 800 ppm. Therefore, the air quality in the children's bedrooms was lower compared to the cases with constant ventilation or the simple control. The air quality in the children's bedroom always fulfills the requirement for a class II quality. The air quality can be improved by a lower setpoint for CO₂-concentration, but the result is that the ventilation system behaves more and more like the simple control, which is much more simple to implement and much cheaper.

The advanced control gives possibility for larger energy savings than the simple control because the total air change in the house is reduced. The advanced strategy used in this project does not use the full potential of these savings because the implemented control strategy maintains a too high pressure in the duct system. It is necessary to further develop the control algorithm to achieve the full saving potential.

Even though the two strategies have been implemented and tested for a long period of time, only the simple control can be recommended. The simple control ensures that the air quality is almost the same as if the house was ventilated constantly at the high ventilation rate. Also the simple control only requires two CO₂ sensors, two relative humidity sensors and two temperature sensors in the air handling unit. These sensors should be checked from time to time e.g. when filters are exchanged. The simple control is today used in meeting rooms, office rooms and daycare facilities in a modified form.

The advanced control has some potential advantages compared to the simple control. This is mainly the possibility to achieve better use of the air by supplying it where it is needed. To achieve energy savings compared to the simple control it is necessary to also reduce the air change rate during occupancy. This will lead to a discussion on whether this control results in reduced air quality and whether this reduction is acceptable. There is at present time not enough knowledge on how the indoor climate affects health of the occupants to recommend that the air change rate can be reduced during occupancy. More results are needed from laboratory and field experiments before the advanced control can be recommended.

1 Indledning

Ifølge regeringens energiplan og EU direktiv af 16. december 2002 om bygningers energimæssige ydeevne skal der gennemføres en øget indsats for at opnå konkrete, dokumenterbare energibesparelser i bygninger. Direktivet fastlægger at den energimæssige ydeevne skal vurderes ud fra den nødvendige energimængde til opfyldelse af de forskellige behov, som er forbundet med en normal brug af bygningen, herunder ventilation. Bygningsreglementet stiller som udgangspunkt krav om et luftskifte på 0,5 gange i timen men stiller også krav om, at installationer skal udføres så unødvendig energiforbrug undgås.

Flere og flere nye enfamiliehuse bygges i dag med mekanisk ventilation med varmegenvinding hvor de tidligere næsten kun blev udført med naturlig ventilation. Med fremtidens skærpede krav til energiforbruget i boliger bliver mekanisk ventilation med varmegenvinding næsten en nødvendighed. Desuden er der kommet mere fokus på luftkvaliteten i vores boliger. Den gode luftkvalitet opnås kun gennem effektiv ventilation, hvilket mest energieffektivt kan opnås gennem mekanisk ventilation med varmegenvinding. Disse træk i udviklingen vil medføre, at mekanisk ventilation med varmegenvinding bliver nødvendigt i enfamiliehuse i fremtiden og en større udbredelse vil sandsynligvis påvirke prisen så anlægsomkostninger bliver lavere.

Energiforbruget til ventilation udgør en væsentlig del af det samlede energiforbrug i boliger og udvikling af varmevekslere og ventilatorer med bedre effektivitet kan ikke alene reducere energiforbruget til boligventilation væsentligt. Der er behov for at gøre op med bygningsreglementets krav om konstant ventilation i boliger ved at indføre mulighed for behovstyring.

SBi har vurderet muligheder for behovstyring baseret på relativ fugtighed i etageejendomme med udsugningsanlæg og konkluderer, at udelufttilførslen kan reduceres med 20% til 30 % i forhold til gældende regler uden at indeklimaet forringes (Bergsøe, 2000). Efterfølgende forsøg med udsugningsanlæg reguleret efter indeluftens relative fugtighed i et mindre antal lejligheder viser en mindre reduktion på ca. 15 % i udelufttilførslen i forhold til gældende regler (Bergsøe og Afshari, 2008). Ventilation efter behov muliggør derfor energibesparelser sammenlignet med en situation med konstant ventilation ved at luftskiftet kan reduceres uden at indeklimaet forringes. Ventilation efter behov vil også muliggøre bedre luftkvalitet, da luftskiftet i boligen også kan øges. På denne baggrund forventes det at behovstyring også i enfamiliehuse kan medvirke til væsentligt reduceret energiforbrug samtidig med indeklimaforbedringer.

Behovstyret ventilation (DCV-ventilation) er kendt fra andre områder f.eks. skoler og kontorbygninger. Anlægsomkostningerne for disse anlæg er væsentligt højere end anlæg med konstant ventilation (CAV-anlæg) hvilket skyldes behovet for specielle indblæsningsarmaturer og reguleringsmuligheder i kanalsystemet og aggregatet. Anlæg til ventilation af enfamiliehuse er ikke nær så komplicerede og luftstrømmene i anlæggene er væsentligt lavere sammenlignet med større anlæg i skoler og kontorbygninger. De eksisterende komponenter og principper for DCV-ventilation er derfor ikke nødvendigvis anvendelige i boliger. Det forventes at principper og komponenter for DCV-ventilation i boliger kan udformes simplere og billigere end til store anlæg.

I takt med denne stramning vil der på ventilationssiden kunne skabes følgende forbedringer:

- Ventilationsanlæggets specifikke elforbrug forbedres (reduktion i elforbrug)
- Ventilationsanlæggets varmegenvinding forbedres (reduktion i opvarmningsbehov)
- Behovsstyring af luftskiftet i boligen (reduktion i elforbrug og opvarmningsbehov)

Der sker løbende forbedringer på de to første punkter, men det sidste punkt er rent lovmæssigt låst fast. Det er dog ikke holdbart i længden med krav til et konstant luftskifte i døgnets 24 timer uanset det faktiske behov.

I dette projekt afprøves totalsystemløsninger i en eksisterende bolig. Udgangspunktet for løsningerne er helt basale krav:

- Der må ved normal (og korrekt) brug af boligen ikke kunne opstå fugttekniske problemer forårsaget af behovsstyringen
- Det atmosfæriske indeklima må ikke forringes ved behovsstyringen

I projektet er overordnet undersøgt 2 forskellige reguleringsstrategier: En relativ simpel og billig strategi, og en relativ avanceret og dyr strategi:

1. *Simple regulering:* Luftudskiftningen varierer ensartet for alle rum svarende til et gennemsnitligt luftskifte for hele boligen på enten $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ eller $0,35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. Variationen i luftskifte styres af centrale ventilationsaggregatsensorer (relativ luftfugtighed, temperatur og CO_2) placeret i udsugningsluften og udeluften. Reguleringen foretages på baggrund af CO_2 -koncentration og absolut fugtighed i både indblæsnings- og udsugningsluft. Registrering af en fast forskel i CO_2 -koncentrationen mellem indblæsnings- og udsugningsluft aktiverer det høje trin. Når forskellen i CO_2 -koncentrationen igen er under grænseværdien køres ned på det lave trin. Som supplement til CO_2 -styringen måles forskellen i absolut fugtighed mellem indblæsnings- og udsugningsluft, for at sikre at ventilationen forbliver på det høje trin, såfremt der er en fugtproduktion når ingen er hjemme (evt. pga. tørring af tøj).
2. *Avanceret regulering:* Luftskiftningen varierer dynamisk for alle opholdsrum svarende til et gennemsnitligt luftskifte for hele boligen i intervallet $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ til $0,35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. Variationen i luftskifte for de enkelte opholdsrum styres af CO_2 -sensorer placeret i hvert opholdsrum og reguleringsspjæld i indblæsningssystemets tilslutningskanaler. Der er yderligere placeret sensorer for relativ luftfugtighed i de fugtbelastede rum som sikrer et gennemsnitlige luftskifte for hele boligen forceret til 0,5 gange pr. time hvis der er høj relativ fugtighed i et af de fugtbelastede rum.

Der er udført en række forsøg med disse to reguleringsstrategier i et nyere parcelhus fra 2002 med et opvarmet gulvareal på 140 m^2 . Husets eksisterende ventilationssystem er modificeret for at muliggøre behovsstyringen. Huset bebos af to voksne og to mindre børn. Begge voksne har arbejde i dagtimerne, hvor børnene passes udenfor huset. Forsøgene har fokuseret på indeklimaparametre (CO_2 og fugtighed) i boligens rum og funktionen af ventilationsanlægget. Der er ikke udført måling af elforbruget til ventilationsanlægget og pga. udfald i dataopsamlingen findes ikke præcise data for luftmængder.

Varmebehovet til opvarmning af friskluften og elforbruget til mekanisk ventilation afhænger af luftskiftet i boligen. En reduktion af det gennemsnitlige luftskifte vil således kunne medføre

reduktion i både opvarmningsbehovet og elforbruget til den mekaniske ventilation. Ifølge Bygningsreglementet (EBST, 2008) skal boligen mindst ventileres med en udeluftstrøm på $0,35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. I boliger med et balanceret mekanisk anlæg skal desuden tages hensyn til en ekstra infiltration gennem utætheder i boligen. I en bolig som blot overholder tæthedskravet i bygningsreglementet skal der regnes med en infiltration på $0,13 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. Den besparelse på opvarmningen som opnås ved balanceret mekanisk ventilation er afhængig af at huset tætnes bedre end kravet i bygningsreglementet. Derfor gives i det følgende også vurderinger for en tæt bolig med halvt så stor infiltration. I anlægget med behovstyring antages luftstrømmen i den mekaniske ventilation over året reduceret med 25 % på baggrund af analyser udført af SBI (Bergsøe, 2000). Ved vurdering af elforbruget til ventilation er det specifikke elforbrug (SEL) for ventilatorerne antaget konstant til 1200 J/m^3 (selvom det i dag er muligt at udføre anlæg med væsentligt lavere elforbrug). I virkeligheden må også forventes en reduktion af SEL-værdien når volumenstrømmen reduceres, da tryktabet i kanalsystemet reduceres. Elforbrug forbundet med automatik er ikke medtaget. Energiforbruget forbundet med opvarmning af ventilationsluften i fyringssæsonen og elforbruget til ventilatorer i drift hele året er angivet i Tabel 1. Beregningerne er udført vha. metoden anvendt i Be06 udviklet på SBI (Aggerholm og Grau, 2008).

Tabel 1. Energiforbrug ved forskellige typer ventilation i enfamiliehus.

		Varmeforbrug kWh/m^2	Elforbrug kWh/m^2	Brutto energi ¹ kWh/m^2
Naturlig ventilation		46	0	46
BR mindste krav til mekanisk ventilation og tæthed af klimaskærm	Mekanisk VGV 65% og SEL 1200 J/m^3	33	3,7	42
	Mekanisk VGV 65%, SEL 1200 J/m^3 og behovstyring	29	2,8	36
Effektivt mekanisk ventilationsanlæg og meget tæt klimaskærmen	Mekanisk VGV 85% og SEL 1000 J/m^3	15	3,1	23
	Mekanisk VGV 85%, SEL 1000 J/m^3 og behovstyring	14	2,3	20

¹El vægtes med faktor 2,5 sammenlignet med varme

Mht. varmebesparelser ses, at det hovedsageligt er vigtigt med en meget effektiv varmegenvinding. Varmegenvindingen for det effektive mekaniske anlæg giver store varmebesparelser i forhold til den naturlige ventilation og hovedparten (8 kWh/m^2) af det tilbageværende opvarmningsbehov skyldes infiltrationen selvom klimaskærmen er meget tæt. For det effektive mekaniske ventilationanlæg giver behovstyringen meget lille ekstra besparelse på opvarmningsbehovet, men giver en væsentlig reduktion i elforbruget. For det effektive mekaniske anlæg giver varmegenvindingen i forhold til en naturlig ventileret bolig en varmebesparelse på 31 kWh/m^2 og behovstyringen medfører kun en yderligere varmebesparelse på 1 kWh/m^2 . Den effektive mekaniske ventilation medfører et elforbrug på $3,1 \text{ kWh/m}^2$ uden behovstyring og $2,3 \text{ kWh/m}^2$ med behovstyring. Besparelsen ved behovstyring i forhold til alm. mekanisk ventilation er på 25 % af elforbruget.

For et mekanisk ventilationsanlæg som lige netop opfylder mindstekravene i Bygningsreglementet medfører behovstyringen en besparelse på bruttoenergiforbruget på 6 kWh/m^2 . Hvis det mekaniske ventilationsanlæg bygges med en bedre kvalitet, som kan opnås med eksisterende anlæg, fås en

besparelse på bruttoenergiforbruget på 3 kWh/m². Et enfamiliehus i lavenergi klasse I har en energiramme på ca. 40 kWh/m² og besparelsen ved behovstyring med et effektivt ventilationanlæg udgør således 7,5 % af energirammen, hvilket er en væsentlig andel.

2 Reguleringsstrategier for termisk indeklima

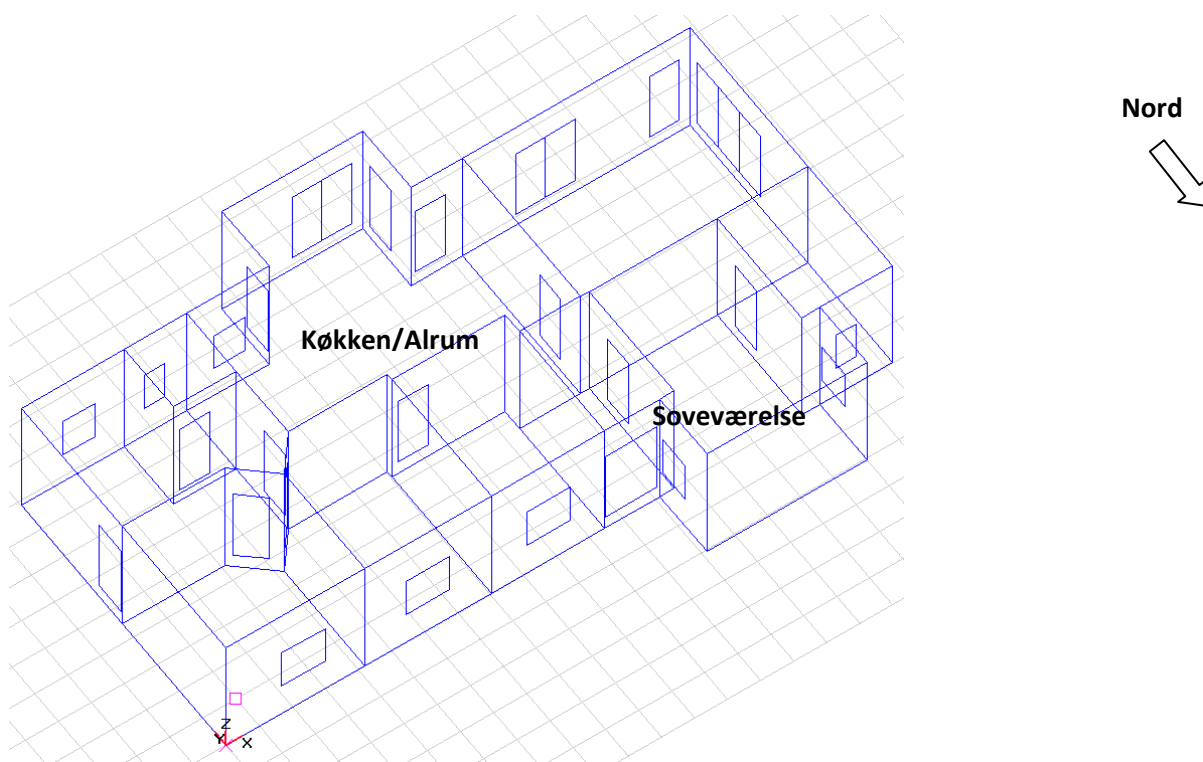
I boliger er ventilation nødvendig af hensyn til bygningskonstruktioner og menneskets komfort, der både afhænger af det atmosfæriske og det termiske klima. Indreguleringen af et ventilationssystem foretages ud fra bygningsreglementets krav (EBST, 2008) om et basisluftskifte i boliger svarende til en udelufttilførsel på mindst $0,35 \text{ l/s pr. m}^2$, hvilket ikke nødvendigvis er en optimal energioekonomisk eller komfortmæssig løsning.

I det følgende analyseres forhold vedr. rumtemperaturen i forbindelse med udviklingen af en dynamisk behovsstyret reguleringsstrategi for et ventilationsanlæg til boliger med henblik på at minimere energiforbruget.

2.1.1 Referencehus

Der er til analyserne anvendt simuleringsprogrammet BSim (SBI, 2002) hvor der er opbygget en model af et typehus med et energiforbrug svarende til Lavenergiklasse 1 (EBST, 2008). Husets bebyggede areal er 197 m^2 og der anvendes gulvvarme i alle rum og et ventilationsanlæg med varmegenvindingseffektivitet 87 %. Husets konstruktioner er opbygget efter beskrivelsen i rapporten "Udvikling af typehuse i lavenergiklasse 1" (Rose, 2007).

Simuleringsmodellen af typehuset er vist på Figur 1. Huset har et køkken/alrum mod syd og et soveværelse mod nord. Disse to rum vil blive anvendt til de efterfølgende analyser.



Figur 1 Simuleringsmodel af typehus med et energiforbrug svarende til lavenergiklasse 1 med angivelse af placering af køkken/alrum mod syd og soveværelse mod nord

2.1.2 Simulering efter bygningsreglementets krav til udelufttilførelse til beboelsesrum

En reference simulering er foretaget efter bygningsreglementets krav om en udelufttilførelse på mindst 0,35 l/s pr. m² (EBST, 2008). Kravet er overholdt ved at lave indblæsning og udsugning som vist i Tabel 2.

Tabel 2 Oversigt over simuleringsinput til de forskellige rum i huset.

	Areal (Brutto) [m ²]	Areal (Netto) [m ²]	Ventilation Udsugning [l/s]	Ventilation Indblæsning [l/s]	Gulvvarme Setpunkt [°C]
Bad 1	10,16	7,67	15	0	23
Bad 2	4,05	2,93	15	0	23
Bryggers	18,79	14,96	10	0	21
Forstue (Entre)	7,80	6,54	0	0	21
Køkken/Alrum	46,99	40,23	20	20	21
Opholdsstue	35,21	29,18	0	20	21
Soveværelse	24,14	19,83	0	5	18
Værelse 1	14,75	12,66	0	5	21
Værelse 2	16,79	14,51	0	5	21
Værelse 3	18,32	14,05	0	5	21
I alt	197	163	60	60	-

Med de angivne volumenstrømme fås en udelufttilførsel på ca. 0,37 l/(s m²).

2.2 Oversigt over simuleringsanalyser

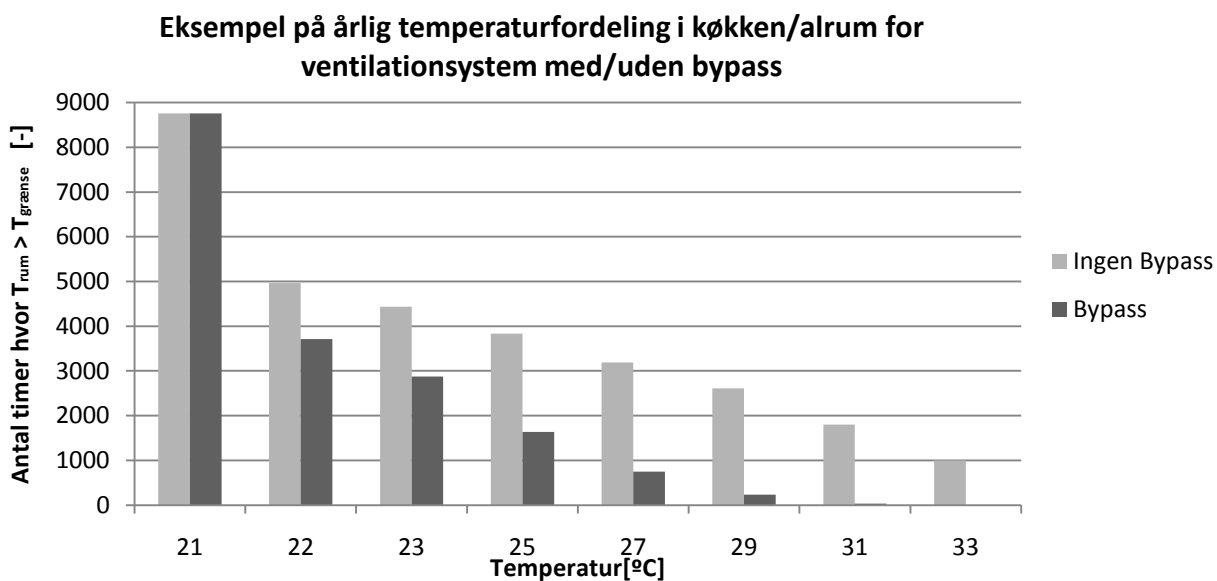
Der er med den beskrevne simuleringsmodel foretaget analyser af følgende forhold:

- Ventilationssystem med og uden et bypass spjæld
- Udluftning med vinduer

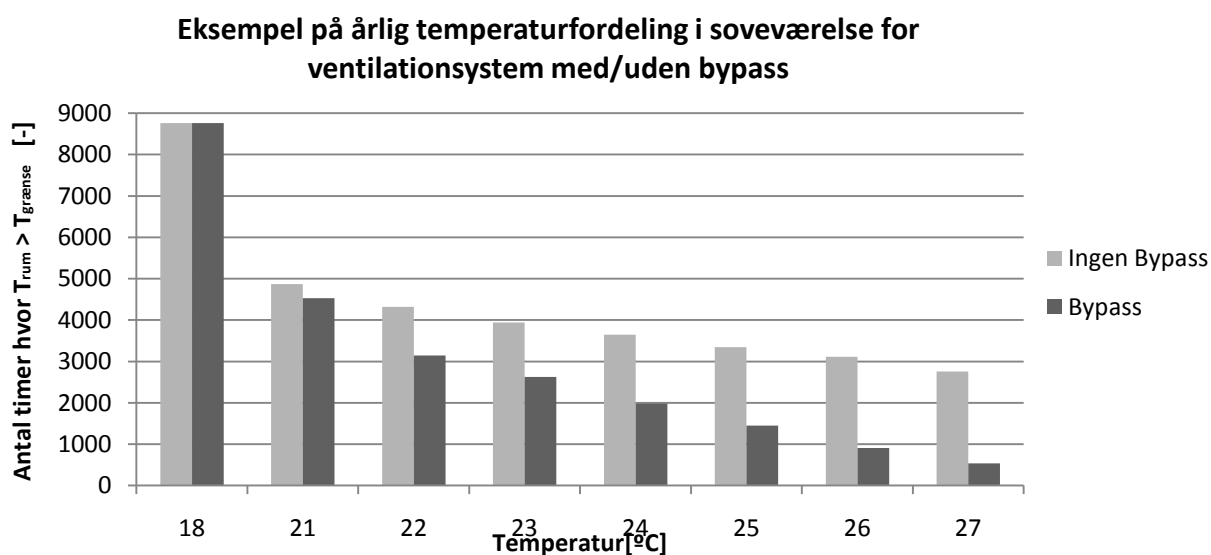
2.2.1 Ventilation med/uden bypass

I varme perioder vil varmegenvinding i ventilationsaggregatet medvirke til for høje temperaturer i boligen, hvor ventilation bør medvirke til at fjerne varmetilskud fra boligen. For at få fuld udnyttelse af den lavere udelufttemperatur er det nødvendigt at udstyre anlægget med et bypass spjæld, således at indblæsningsluften kan føres udenom varmeveksleren.

I det følgende ses alene på effekten af bypass i ventilationsaggregatet til at regulere indblæsningstemperaturen. Udluftning i det følgende ikke medtaget. Figur 2 og Figur 3 viser en sammenligning af antallet af timer ved forskellige temperaturniveauer i hhv. køkken/alrum og soveværelse for et ventilationsanlæg med og uden et bypass spjæld.

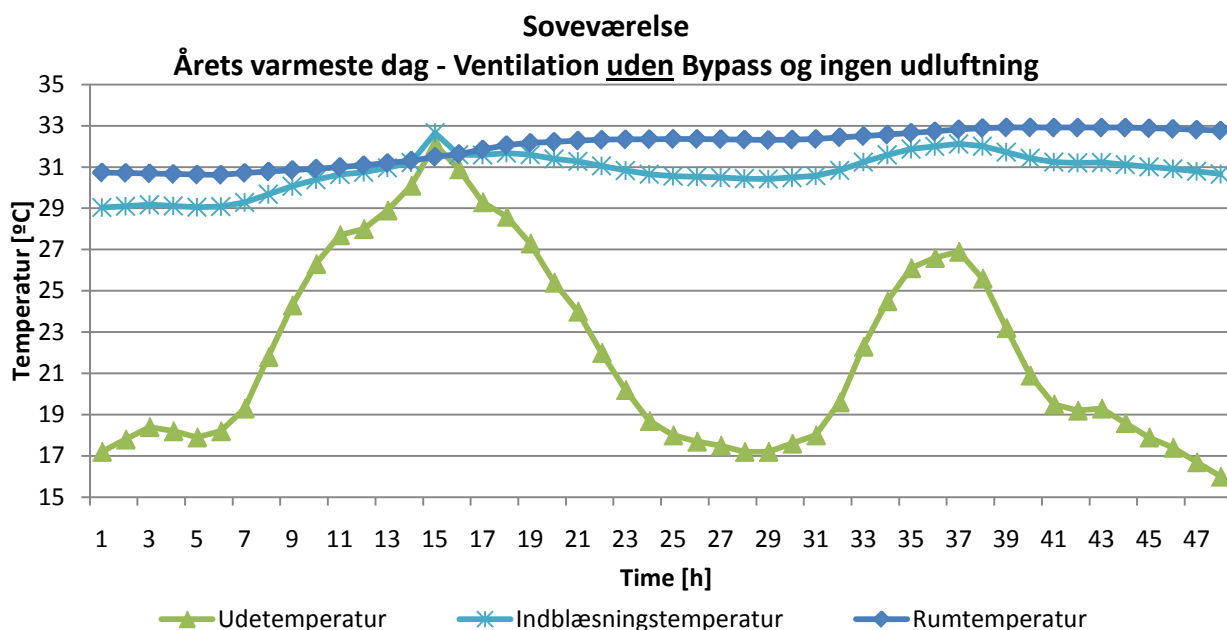


Figur 2 Simuleret årlig temperaturfordelingen i køkken/alrum med ventilationsanlæg med varmegenvinding med og uden bypass mulighed. Varmesystemets setpunkt er simuleret til 21 °C

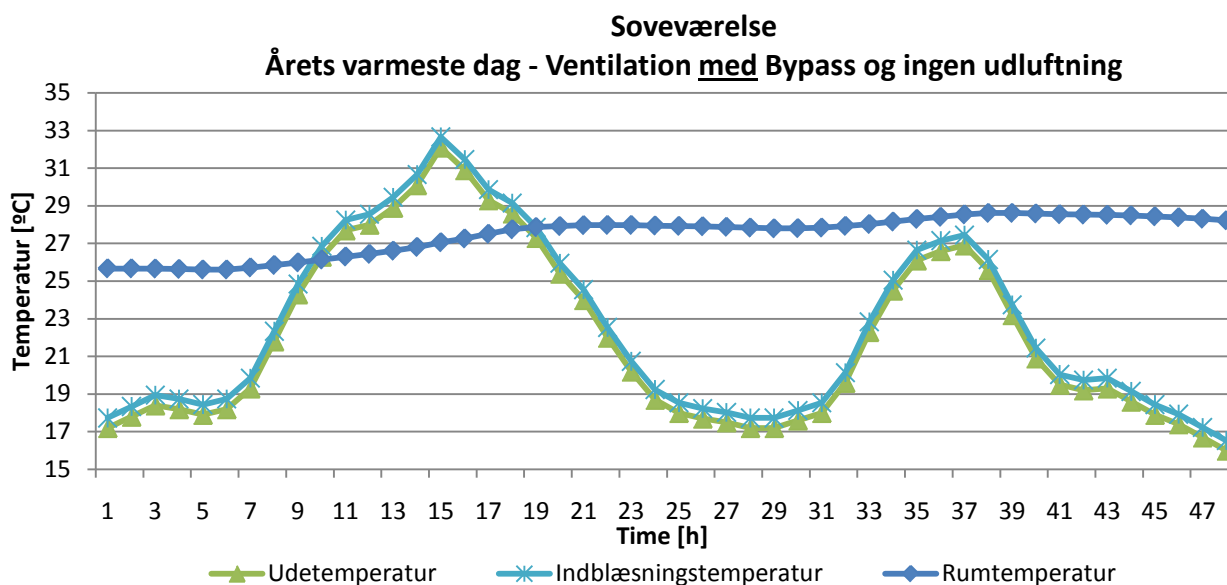


Figur 3 Simuleret årlig temperaturfordeling i soveværelse med ventilationsanlæg med varmegenvinding med og uden bypass mulighed. Varmesystemets setpunkt er simuleret til 18 °C

Det ses, at temperaturen generelt er markant højere i både køkken/alrummet og soveværelset, hvis ventilationsanlægget ikke er udstyret med et bypass spjæld. Figur 4 og Figur 5 viser et eksempel på hvordan indblæsningstemperaturen påvirkes af bypass-muligheden på en af referenceårets varme dage. Indblæsningstemperaturen er desuden sammenholdt med rumtemperaturen og udetemperaturen.



Figur 4 Simuleret indblæsningstemperatur i soveværelset på en af referenceårets varmeste dage sammenholdt med udetemperaturen og rumtemperaturen i soveværelset. Simuleringen er foretaget således at bypass ikke er mulig for ventilationssystemet selvom rumtemperaturen er højere end ønsket.

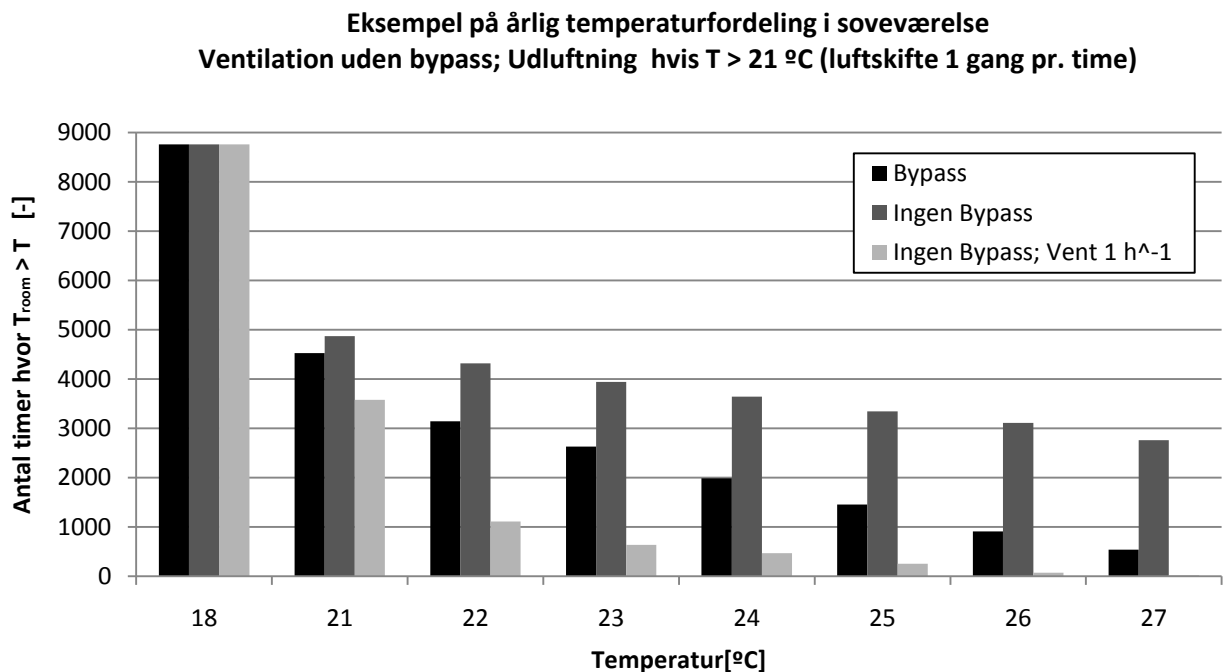


Figur 5 Simuleret indblæsningstemperatur i soveværelset på en af referenceårets varmeste dage sammenholdt med udetemperaturen og rumtemperaturen i soveværelset. Simuleringen er foretaget med bypass mulighed for ventilationssystemet.

Som følge af den manglende mulighed for bypass af varmegenvindingsenheden ses af Figur 4 at indblæsningstemperaturen i løbet af natten i høj grad påvirkes af rumtemperaturen og således har en begrænset køleeffekt. Rumtemperaturen ses at være 4 °C til 5 °C højere i situationen uden mulighed for bypass.

2.2.2 Udluftning ved brug af vinduer

Effekten ved udluftning af en bolig med fx vinduer er også medtaget i analysen. Der er antaget et maksimalt luftskifte på 1 gang i timen ved rumtemperaturer over 21 °C, hvilket vurderes at være et realistisk niveau på lune sommeraftener. Udluftningen antages kun at kunne finde sted i den tid, hvor husets beboere er hjemme, hvilket er tidsrummet fra 18 – 07.



Figur 6 Simuleret årlig temperaturfordeling i soveværelse med ventilationsanlæg med varmegenvinding med og uden bypass mulighed suppleret med en simulering hvor der antages et luftskifte på 1 gange pr. time ved udluftning når temperaturen er højere end 23 °C. Varmesystemets setpunkt er simuleret til 18 °C.

Det ses, at udluftning ved brug af fx vinduer kan reducere antallet af timer med uønsket høje temperaturer betydeligt selvom ventilationsanlægget ikke her indbygget bypass. Det kan dog være svært at opnå et luftskifte på 1 h⁻¹ i vindstille perioder, hvilket simuleringen ikke tager højde for.

2.3 Konklusion vedr. termisk indeklima

For at undgå overophedning i boligens rum er det nødvendigt med et effektivt bypass i ventilationsagregatet. Pga. den lave luftmængde i ventilationsanlægget har den mekaniske ventilationen meget lille kølekapacitet. Om sommeren kan luftskiftet forceres mekanisk for yderligere at reducere temperaturen eller udluftning gennem vinduer kan supplere den mekaniske ventilation. Forcing af den mekaniske ventilation vil medføre forøget elforbrug og kræve installation af større ventilationsanlæg. Mht. at undgå overophedning om sommeren anbefales at ventilationsanlægget udformes med bypass og at den mekaniske ventilation suppleres med udluftning via vinduer. Sommerens udelufttemperatur bevirker at udluftning gennem vinduer om sommeren ikke giver væsentlig anledning til diskomfort og giver heller ikke anledning til øget opvarmningsbehov. Udluftning om vinteren er ikke ønskeligt, da det øger opvarmningsbehovet og giver anledning til termisk diskomfort.

I det følgende ses udelukkende på regulering af luftstrømmen efter parametre for det atmosfæriske indeklima.

3 Reguleringsstrategier for atmosfærisk indeklima

3.1 Simpel reguleringsstrategi

Den simple reguleringsstrategi baseres på at ventilationen kan køre på to trin. Et lavt trin på $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ og et højt trin på $0,35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. Den lave ventilationsrate er valgt på baggrund af indeklimastandarden EN15251, hvor $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ angives som mindste ventilationsrate for kontorbygninger uden persontilstedeværelse, og på baggrund af det Svenske Bygningsreglement (Boverket, 2008), som tillader at boliger ventileres med $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ når der ikke er personer i boligen. Den simple reguleringsstrategi giver ikke mulighed for individuel rumregulering, da der kun reguleres på ventilatorens omdrejningstal.

Reguleringen skal sørge for, at ventilatoren kører på det lave trin, når der ikke er personer tilstede og der samtidig ikke er høj fugtighed i boligen. Ventilatoren skal reguleres op på det høje trin når personer er til stede og hvis der er høj fugtighed i boligen.

Reguleringen foretages på baggrund af CO_2 -koncentration og absolut fugtighed (beregnes ud fra måling af temperatur og relativ fugtighed) i både friskluft og udsugningsluft. Registrering af en fast forskel i CO_2 -koncentrationen mellem indblæsnings- og udsugningsluft aktiverer det høje trin. Når forskellen i CO_2 -koncentrationen igen er under grænseværdien køres ned på det lave trin. Der etableres efterløb hver gang der skiftes indstilling for at undgå pendling. Som supplement til CO_2 -styringen måles forskellen i absolut fugtighed mellem ude- og udsugningsluft, for at sikre at ventilationen forbliver på det høje trin, såfremt der er en fugtproduktion når ingen er hjemme (evt. pga. tørring af tøj).

3.1.1 Grænseværdier for absolut fugtighed

Det skal sikres af fugt fjernes effektivt fra boligen. Det er et ønske at den relative fugtighed om vinteren kan holdes under 50 %. Udeluft med temperatur 5°C og 100 % relativ fugtighed har absolut fugtighed $5,4 \text{ g/kg}$. Indeluft med temperatur 20°C og relativ fugtighed 50 % har absolut fugtighed $7,3 \text{ g/kg}$. Dette svarer til en forskel i absolut fugtighed mellem inde- og udeluft på ca. 2 g/kg . I Danmark er udeluftens temperatur under 5°C ca. 3000 timer om året. Ved at anvende højst 2 g/kg som grænseværdi for forskellen mellem absolut fugtighed i udsugningsluften og udeluften for at aktivere det høje ventilationstrin sikres, at ventilationsanlægget kører på det høje ventilationstrin når fugtindholdet i indeluften kan medføre for høj relativ fugtighed inden døre om vinteren. Det skal dog bemærkes, at det høje ventilationstrin ikke sikrer, at den relative fugtighed kommer under 50 %, da ventilationsmængden på det høje trin er fastlagt ud fra bygningsreglementets krav til mindste luftskifte i boliger, hvor det reelle behov for ventilation godt kan være større.

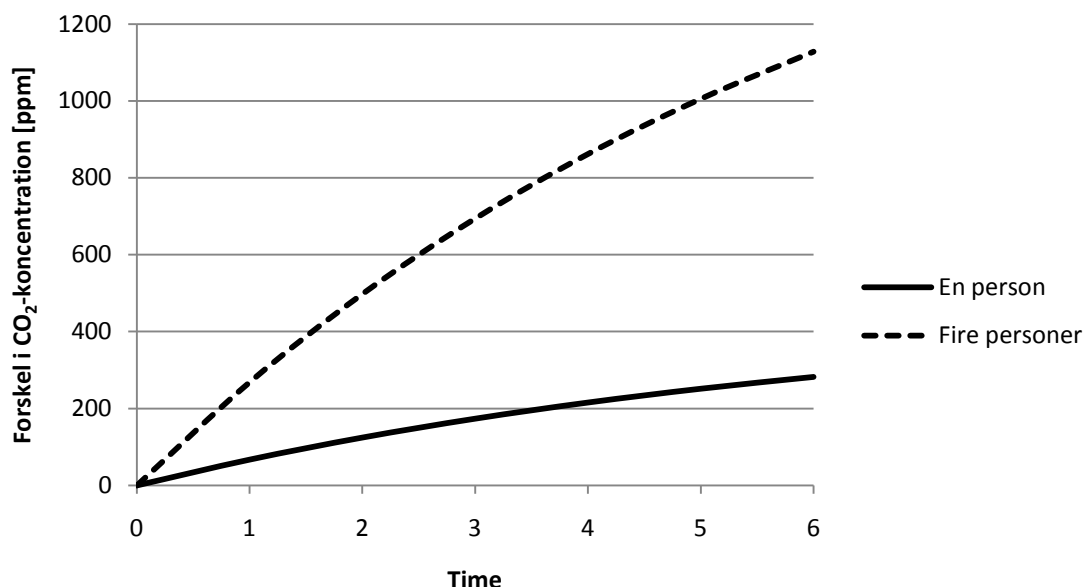
3.1.2 Grænseværdier for CO_2 -koncentration

Reguleringen skal sikre, at ventilationen kører på det høje trin når der er personer tilstede i boligen. Grænseværdien for forskellen mellem CO_2 -koncentrationen i udsugningsluften og udeluften, skal derfor fastlægges således, at det høje ventilationstrin aktiveres et acceptabelt tidsrum efter at personer kommer ind i boligen og også aktiveres ved lav personbelastning.

Figur 7 viser forskellen i CO_2 -koncentration mellem udsugningsluften og udeluften for en bolig med areal 120 m^2 hvor én person eller 4 personer kommer hjem til tiden 0 og boligen ventileres på det lave trin med $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. Det ses, at der går ca. 1,5 time før forskellen når 100 ppm og ca. 3,5 time

før forskellen når 200 ppm i tilfældet hvor én person kommer ind i boligen. I tilfældet med fire personer går der under en time før forskellen overstiger 200 ppm. På denne baggrund vurderes, at grænseværdien for forskellen i CO₂-koncentration bør ligge mellem 100 ppm og 200 ppm.

En personsensor ved indgangsdøre kunne medvirke til at sikre, at anlægget skifter til det høje trin når nogen kommer hjem, men dette er ikke medtaget i dette arbejde.



Figur 7. Forskellen mellem CO₂-koncentrationen i udsugningsluften og udeluften når én person eller fire personer kommer ind i huset til tiden 0 og huset ventileres på det lave trin.

3.1.3 Vurdering af ventilation ved simpel reguleringsstrategi

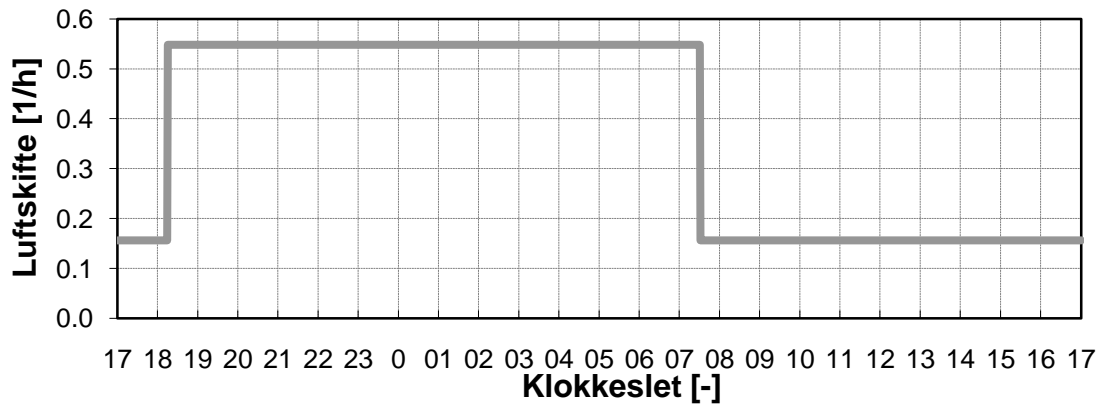
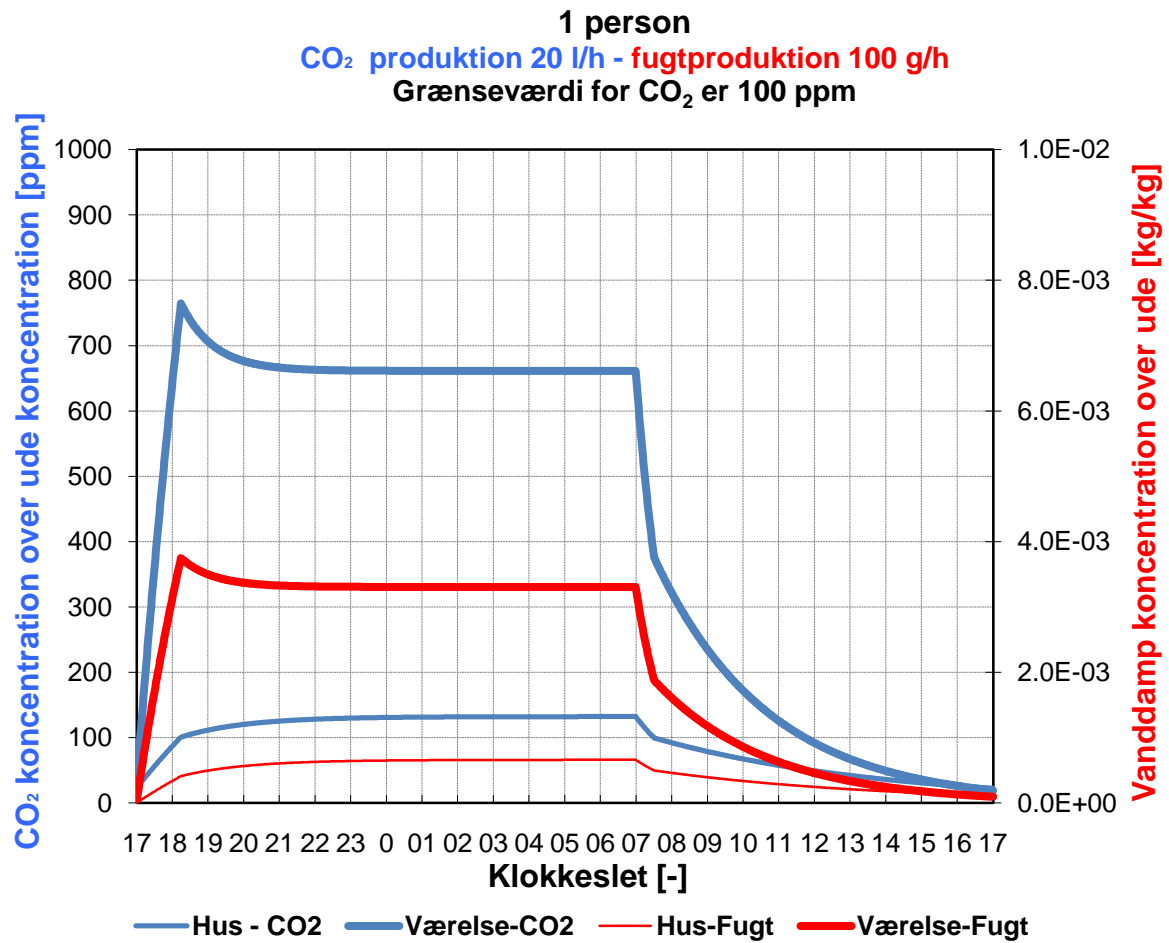
I det følgende betragtes et enfamiliehus med areal 120 m², hvor det lave trin for ventilationen er 0,1 l/(s m²), og det høje trin for ventilationen er 0,35 l/(s m²), som kræves i bygningsreglementet. Personer opholder sig i boligen fra kl. 17 til 7. Det antages, at CO₂-produktionen er 20 l/(h person) og fugtproduktionen er 100 g/(h person). I det følgende medtages kun fugtproduktionen fra personer. Det antages desuden, at boligen har et rum på 12 m² som tilføres 20 % af den samlede luftstrøm fra ventilationssystemet. Dette mindre rum er medtaget for at kunne vurdere koncentrationen af CO₂ og fugt i ét enkelt af boligens rum. Resultaterne i Figur 8 til Figur 11 viser udviklingen i CO₂-koncentrationen og udviklingen vanddampkoncentrationen begge udtrykt som forskellen til udeluftens tilstand. Udviklingen vises for boligen som helhed (dvs. koncentrationen i udsugningsluften) og udviklingen i rummet på 12 m² under den antagelse, at alle personer opholder sig i dette rum. Resultater præsenteres for to forskellige grænseværdier for CO₂ på hhv. 100 ppm og 200 ppm. Og for to belastninger med hhv. én person og fire personer. I alle tilfælde er grænseværdien for fugt sat til 2 g/kg. I alle de præsenterede resultater er det grænseværdien for CO₂ som er afgørende for skiftet mellem lav og høj ventilationsrate.

Beregningerne er udført med tidskridt på 5 min uden efterløb på ventilationen. Derfor ses i et enkelt tilfælde at luftmængden ofte skifter mellem høj og lav rate.

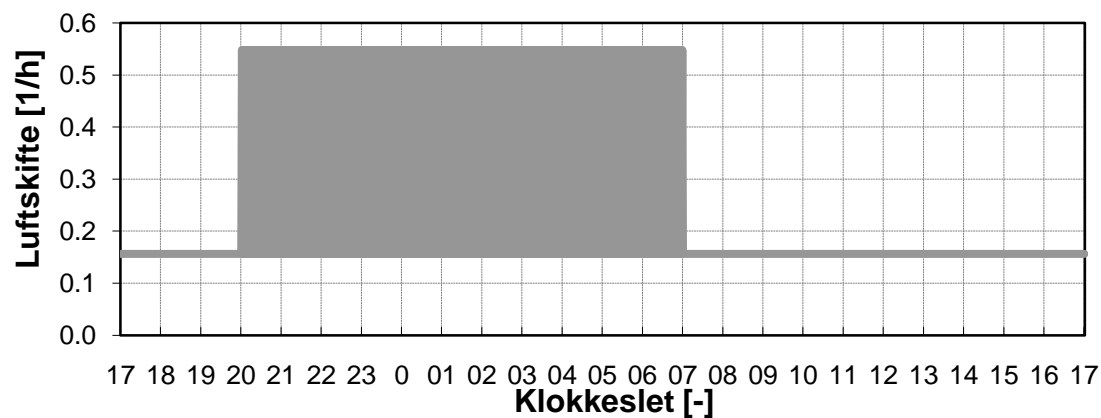
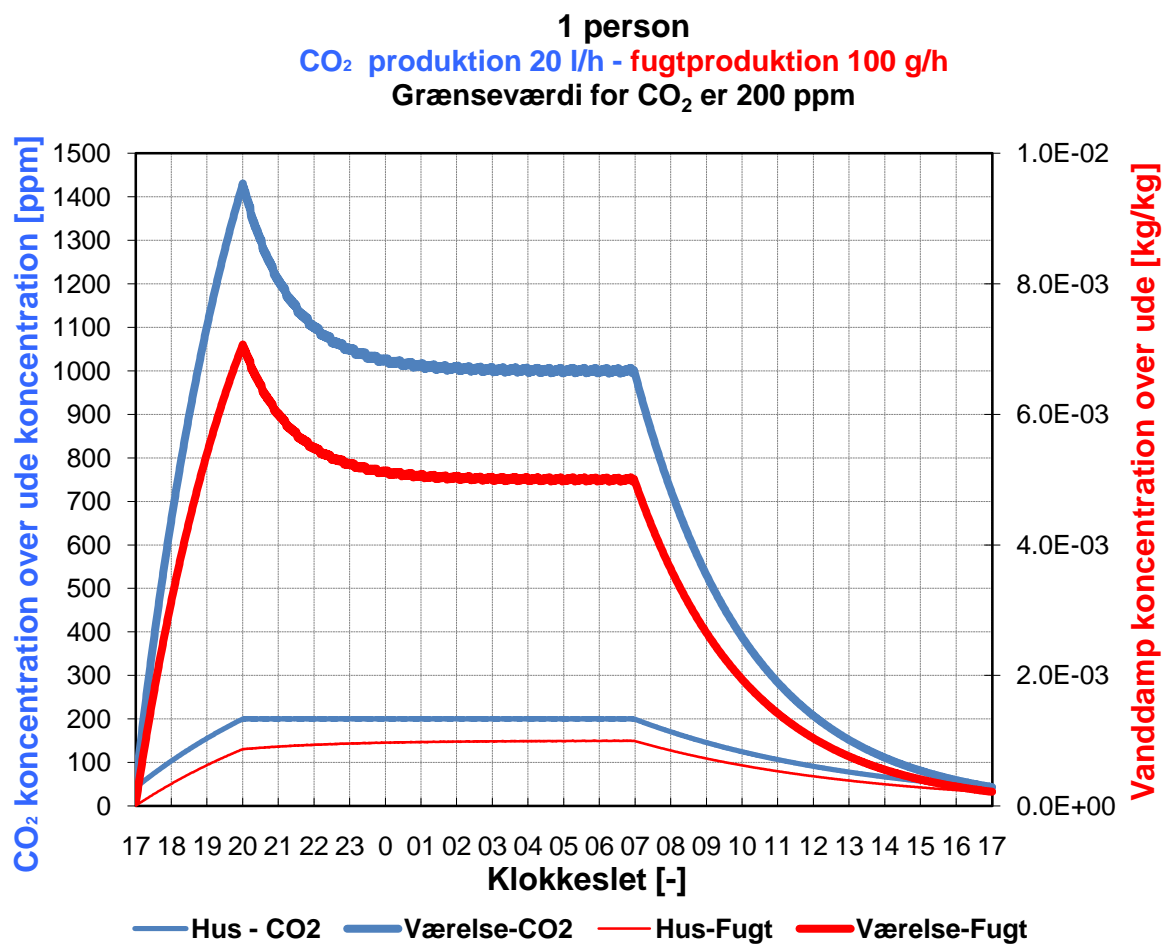
Resultaterne for boligen med én person viser, at ventilationen når personen kommer hjem skifter til det høje trin efter 1 time når grænseværdien er 100 ppm (Figur 8), mens der går 3 timer med grænseværdi på 200 ppm (Figur 9). Når personen forlader bygningen går der under 1 time før ventilationen skifter til det lave niveau. Hvis personen opholder sig hele tiden i en mindre del af bygningen ses desuden, at CO₂-koncentrationen i dette rum hele tiden holder sig tæt på slutkoncentrationen når grænsen er 100 ppm, men at en grænse på 200 ppm medfører en klar forværring af CO₂-koncentrationen i rummet i forhold til slutkoncentrationen ved det valgte luftskifte. Det taler for at anvende en grænseværdi for CO₂-koncentrationen under 200 ppm. Sammenlignet med en konstant ventilation på 0,35 l/(s m²) medfører en grænseværdi på 100 ppm en 26% reduktion af luftmængden over et døgn mens en grænseværdi på 200 ppm medfører en reduktion på 54%.

Resultaterne for boligen med fire personer viser, at ventilationen når personerne kommer hjem skifter til det høje trin efter højst 30 minutter (Figur 10 og Figur 11). Når personerne forlader bygningen går der 2 til 3 timer før ventilationen skifter til det lave niveau. I dette tilfælde er det ikke så interessant at betragte koncentrationen i det lille rum, men det ses, at koncentrationen i ingen af tilfældene overstiger slutkoncentrationen ved det valgte luftskifte. Sammenlignet med en konstant ventilation på 0,35 l/(s m²) medfører en grænseværdi på 100 ppm en 21% reduktion af luftmængden over et døgn mens en grænseværdi på 200 ppm medfører en reduktion på 26%.

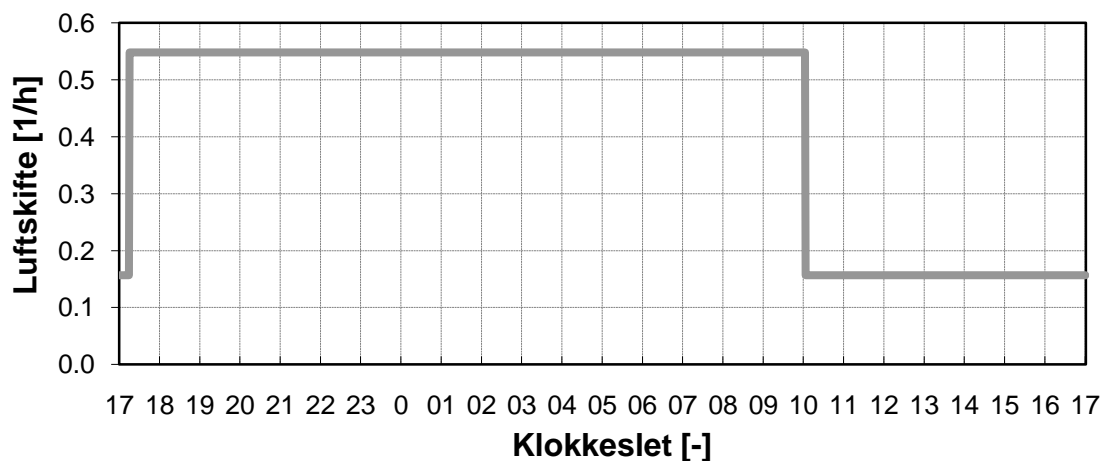
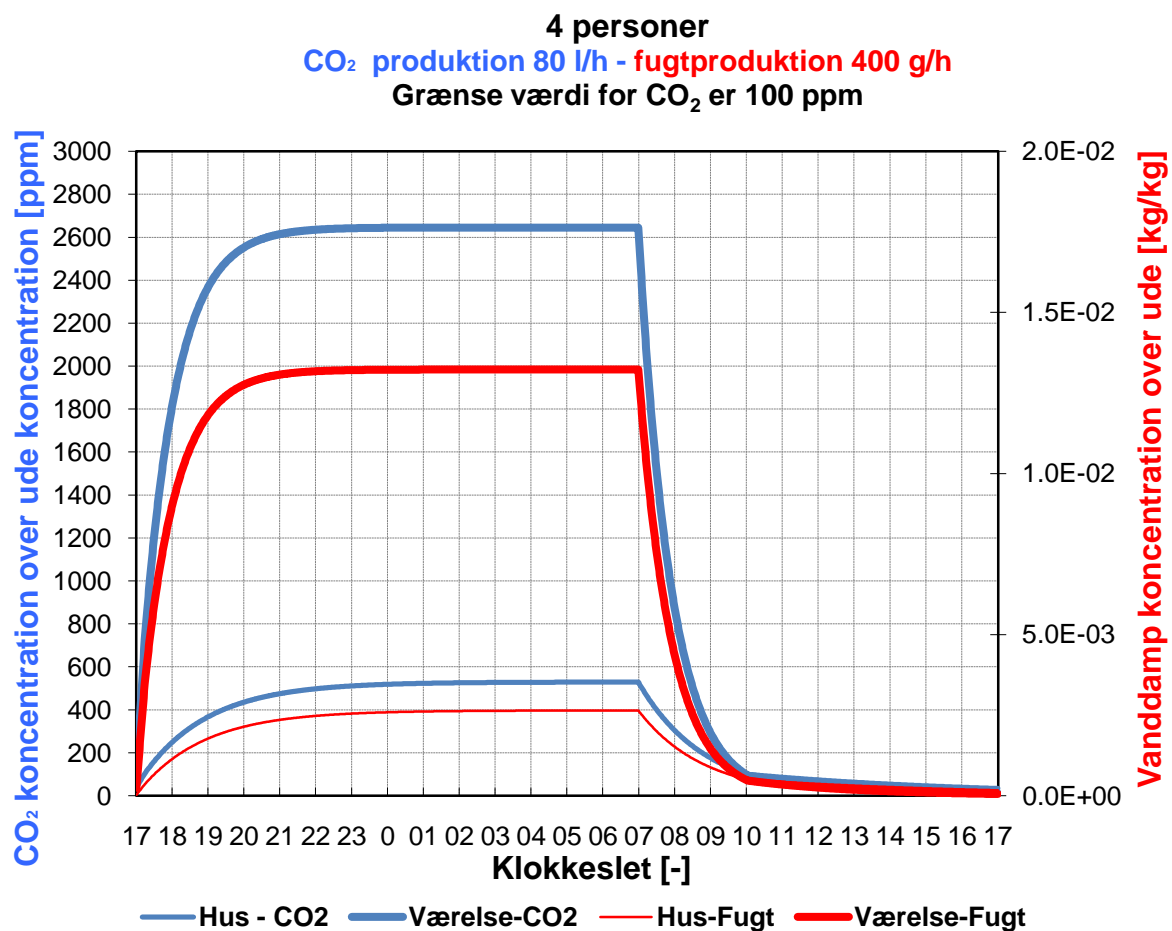
Det ses, at den simple strategi ikke kan tage hensyn til at personerne i boligen vælger kun at opholde sig i en mindre del af boligen. Især i soverum kan personbelastningen blive høj, hvis både forældre og mindre børn sover i lokalet. Den almindelige konstante mekaniske ventilationsrate eller naturlige ventilation via friskluftventiler vil ikke medføre bedre luftkvalitet, da disse løsninger heller ikke giver mulighed for at øge ventilationen udover kravet i bygningsreglementet. For at forbedre luftkvaliteten i en sådan situation skal reguleringen foregå på rumniveau, hvilket undersøges i forbindelse med den avancerede reguleringsstrategi.



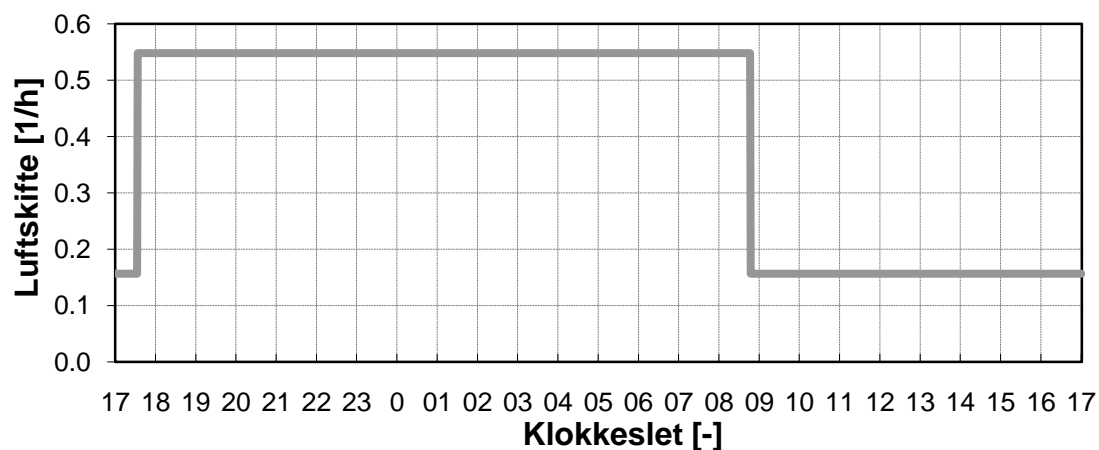
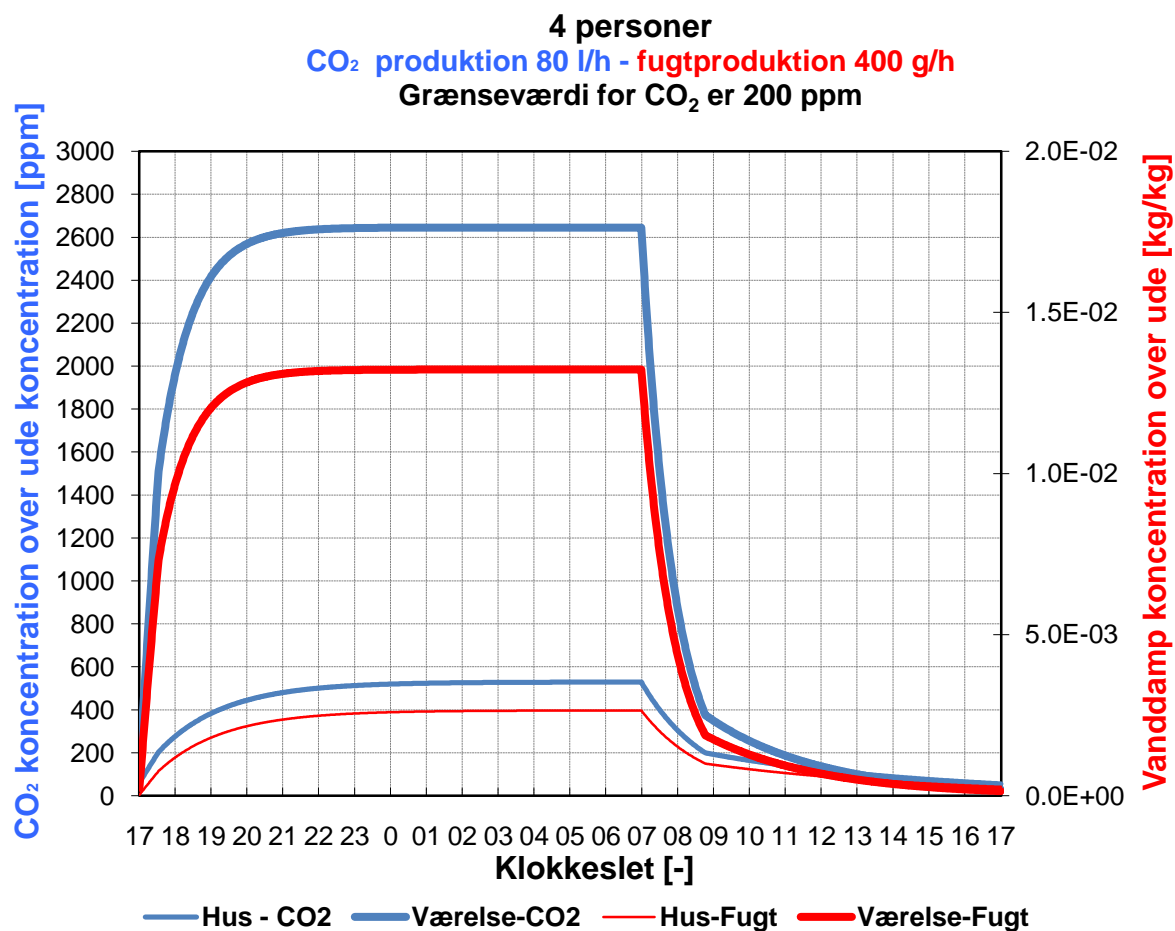
Figur 8. Udvikling i CO₂-koncentration og vanddampkoncentration i bolig med én person med opholdstid fra kl. 17 til 7 hvor ventilationen reguleres efter en grænseværdi for CO₂ på 100 ppm og for fugt på 2 g/kg. Koncentrationer vises for boligen som helhed og for ét rum på 12 m² hvor det antages personen opholder sig.



Figur 9. Udvikling i CO₂-koncentration og vanddampkoncentration i bolig med én person med opholdstid fra kl. 17 til 7 hvor ventilationen reguleres efter en grænseværdi for CO₂ på 200 ppm og for fugt på 2 g/kg. Koncentrationer vises for boligen som helhed og for ét rum på 12 m² hvor det antages at personen opholder sig.



Figur 10. Udvikling i CO₂-koncentration og vanddampkoncentration i bolig med fire personer med opholdstid fra kl. 17 til 7 hvor ventilationen reguleres efter en grænseværdi for CO₂ på 100 ppm og for fugt på 2 g/kg. Koncentrationer vises for boligen som helhed og for ét rum på 12 m² hvor det antages at alle personer opholder sig.



Figur 11. Udvikling i CO₂-koncentration og vanddampkoncentration i bolig med fire personer med opholdstid fra kl. 17 til 7 hvor ventilationen reguleres efter en grænseværdi for CO₂ på 200 ppm og for fugt på 2 g/kg. Koncentrationer vises for boligen som helhed og for ét rum på 12 m² hvor det antages at alle personer opholder sig.

3.2 Avanceret reguleringsstrategi

Den avancerede regulering gør det muligt at regulere luftmængden individuelt til de enkelte rum. Det er valgt at regulere luftmængderne i systemet udelukkende baseret på CO_2 -koncentrationen, som udtryk for luftkvaliteten, samt den relative fugtighed i baderum, køkken og bryggers for at undgå for høj fugtighed i boligen. Anlægget kan i princippet også regulere luftstrømmen efter indetemperaturen i de enkelte rum. Luftstrømmen skal dog kunne øges væsentligt for at påvirke indetemperaturen væsentligt, da systemet ikke er udstyret med varme eller køleflader. Regulering efter indetemperaturen kunne især være relevant i sommerperioden for at undgå overophedning. Det vurderes på baggrund af analyserne i kapitel 2, at den mest energieffektive måde at undgå overtemperatur er at udstyre ventilationsaggregatet med et bypass, som om sommeren leder luften uden om varmeveksleren, og supplere med udluftning gennem vinduer.

Reguleringen anvendt til den avancerede reguleringsstrategi minder om reguleringen kendt fra variable air volume (VAV) systemer. Trinløst regulerbare spjæld i tilslutningskanalerne i indblæsningssystemet regulerer luftstrømmen til de enkelte opholdsrum ved af spjældenes åbning reguleres efter CO_2 -koncentrationen i rummet. Indblæsningsventilatorens hastighed reguleres for at holde et konstant statisk tryk i indblæsningskanalen. Denne konstanttrykregulering sørger for at luftmængden tilpasses til de forskellige anlægskarakteristikker, der fremkommer ved forskellige åbningsgrader af spjældene i indblæsningskanalsystemet. Udsugningsventilatoren reguleres som slave af indblæsningsventilatoren så luftstrømmene i ventilationsanlægget er balanceret. Reguleringen suppleres med fugtmåling i baderum, bryggers og køkken som ved for høj relativ fugtighed i et af disse rum åbner alle spjæld og regulerer ventilatorer op til det højeste ønskede luftskifte. Denne fugtregulering er indført for at sikre tilstrækkelig ventilation ved stor fugtbelastning i boligen.

I udgangspunktet indreguleres anlægget således, at luftstrømmen svarer til kravet i Bygningsreglementet på $0,35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$, når spjældene er i den mest åbne position, og at luftstrømmen er $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$, når alle spjæld står i den mindst åbne position.

For hvert enkelt opholdsrum kan sættes individuelt setpunkt for CO_2 -koncentration og for de enkelte fugtbelastede rum kan sættes en individuel grænseværdi for den relative fugtighed.

I DS/EN 15251 defineres indeklimaklasser hvor klasse I er bedste klasse, som anbefales i rum for følsomme personer med specielle krav til komfort, klasse II anbefales som normalt niveau for indeklimaet og klasse III anbefales som acceptabelt niveau. For atmosfærisk indeklima baseret på CO_2 -koncentration svarer klasse I til at CO_2 -koncentrationen ikke overstiger udekonzentrationen med mere end 350 ppm og klasse II svarer til at CO_2 -koncentrationen ikke overstiger udekonzentrationen med mere end 500 ppm. Desuden anbefales af Arbejdstilsynet at CO_2 -koncentrationen holdes under 1000 ppm på arbejdspladser. I forsøgene undersøges setpunkt for CO_2 -koncentration på 500 ppm (dvs. ca. 150 ppm over udekonzentrationen) for at sikre at spjældene i et lokale åbner når der er personer tilstede i lokalet og setpunkt for CO_2 -koncentration på 800 ppm (dvs. ca. 450 ppm over udekonzentrationen) for at sikre åbne spjæld når der er risiko for at luftkvaliteten er dårligere end klasse II. Spjældindstillingerne alene kan dog ikke sikre overholdelse af en bestemt indeklimaklasse, da den maksimale luftmængde er tilpasset til mindstekravet i Bygningsreglementet.

4 Forsøgshus

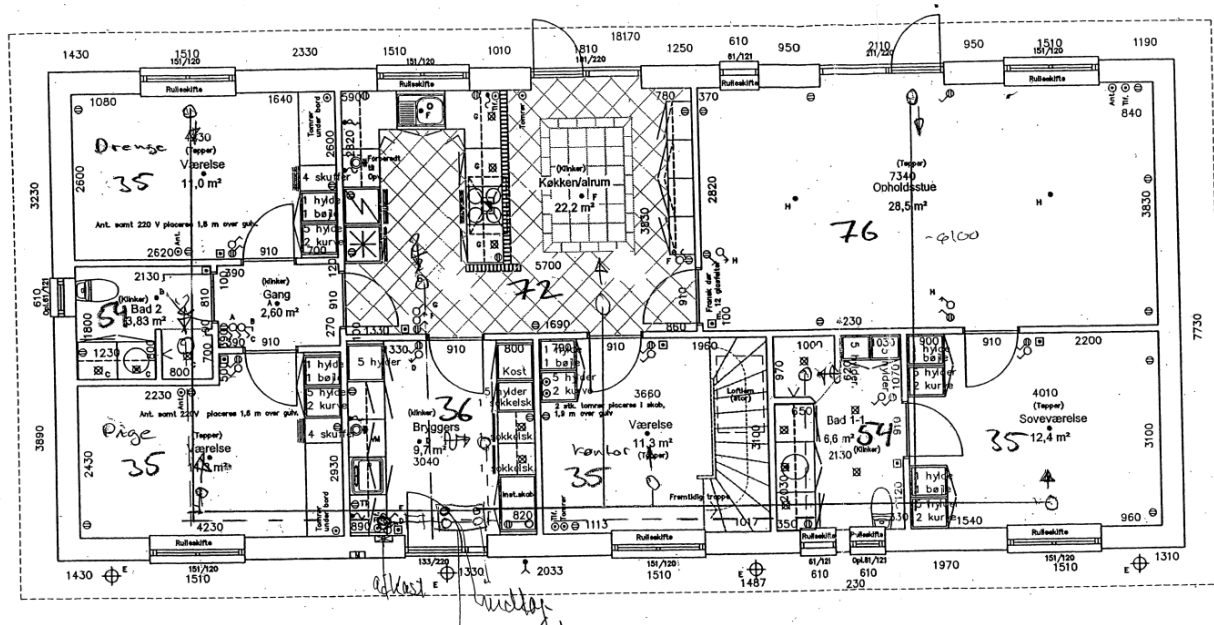
I projektet undersøges de forskellige strategier for behovstyring i et enfamiliehus. Huset er et typehus fra Eurodan-huse bygget i 2002 med etageareal 140 m². Det mekaniske ventilationsanlæg er tilføjet senere. For at muliggøre forsøg med behovstyring har det eksisterende ventilationssystem fået tilføjet motorstyrede spjæld før alle indblæsningsarmaturer, ventilationskanaler i loftrummet er blevet isoleret og ventilationsaggregatet er udskiftet med et aggregat af type L300 fra Ecovent. Desuden er i aggregatet og boligens rum placeret sensorer for temperatur, relativ fugtighed, CO₂-koncentration, trykmåling og måling af luftstrøm. Figur 12 viser en plantegning af huset med angivelse af ventilationskanaler og luftmængder. Huset er under forsøgene beboet af to voksne og to børn.

Udsugningen i badeværelserne foretages i brusekabinen som godt afskærmet med et badeforhæng, der går helt til loftet. Denne indkapsling af badeområde giver et væsentligt reduceret dampudslip til omgivelserne.

De første målinger på huset viste, at luftmængderne var lavere end krævet i Bygningsreglementet, hvilket især var tydeligt for soveværelset, hvor der blev målt meget høje CO₂-koncentrationer. Desuden viste prøvning med røg at ventilationseffektiviteten i soveværelset i starten ikke var særlig god. Ventilationssystemet er herefter indreguleret til en samlet luftmængde på 216 m³/h (BR krav) fordelt således:

Udsugning:	72 m ³ /h fra Køkken/Alrum
	54 m ³ /h fra hvert Baderum
	36 m ³ /h fra Bryggers
Indblæsning:	35 m ³ /h til hvert af de tre værelser og til soveværelset
	76 m ³ /h til Stuen

Efter den nye indregulering blev ventilationseffektiviteten i soveværelset væsentligt forbedret.



Figur 12. Plantegning af enfamiliehus anvendt i projektet. Ventilationsaggregatet er placeret i uopvarmet tagrum over bryggers og plantegningen viser føring af ventilationskanaler. Luftmængder i de enkelte rum er angivet i m^3/h . I forbindelse med projektet er placeret motorstyrede spjæld før alle indblæsningsarmaturer. I projektet er indblæsning til Køkken/Alrum lukket med spjæld.

4.1 Opstilling af forsøg

For at kunne gennemføre de forskellige reguleringsstrategier er huset udstyret med:

I aggregatet:

- Måling af temperatur ved alle fire tilslutninger.

- Måling af relativ fugtighed ved tilslutning for friskluft og tilslutning for udsugningsluft.

- Måling af CO₂-koncentration ved tilslutning for friskluft og tilslutning for udsugningsluft.

- Filtervagt og nedregulering af indblæsningsluftstrøm ved frostrisiko.

- Bypass bygges på.

- Trykfølere til måling af luftstrøm i udsugning og indblæsning via måling over varmeveksler.

I rum:

- Måling af CO₂-koncentration i alle opholdsrum inkl. køkken/alrum.

- Måling af temperatur i alle rum

- Måling af relativ fugtighed i de to baderum, bryggers og køkken.

I kanalsystem:

- Trykføler for konstanttrykregulering til placering i indblæsnings- og udsugningskanal.

- Regulerbare spjæld i tilslutningskanaler for indblæsning.

4.2 Måleudstyr

Anlægget er forsynet med en Trend IQ3Xcite undercentral der styrer og regulerer anlægget. Målerne anvendt i anlægget er alle fra Trend og de benyttede typer er angivet herunder.

Måling af CO₂ i rumluft: TREND CO2+T/S

Måling af CO₂ i ventilationskanal: TREND CO2+T/D

Måling af relativ fugtighed og temperatur i rumluft: TREND HT/S

Måling af relativ fugtighed og temperatur i ventilationskanal: TREND HT/D

Måling af differenstryk: TREND DPIA

5 Simulering af reguleringsstrategier i forsøgshuset

Analyserne vedr. termisk indeklima blev udført før forsøgshuset var på plads og blev udført vha. BSim. BSim er ikke egnet til simulering af de foreslåede reguleringsstrategier, da BSim har ikke kan simulere et mekanisk ventilationsanlæg hvor luftstrømmen reguleres efter CO₂ og fugt. Et andet simuleringværktøj er derfor valgt til analyserne vedr. atmosfærisk indeklima i forsøgshuset. Til simulering anvendes programmet IES VE (IES, 2009). Programmet er opbygget af flere beregningsmoduler som kan anvendes sammen med en fælles geometrisk model. I dette projekt anvendes modeller for simulering af energi og indeklima i bygninger. De moduler fra IES VE som anvendes beskrives kort herunder.

ApacheSim er hovedmodulet til beregning af energistrømme i bygningen. Energibehov og indeklima simuleres ud fra detaljerede modeller for varmestrømme gennem bygningens konstruktioner, varmestråling mellem overflader, ventilationssystemer og varme/kølesystemer (IES, 2008a).

MacroFlo er et modul som udvider ApacheSim med muligheden for at simulere naturlige luftstrømme i bygningen. I modellen anvendes MacroFlo til at håndtere luftstrømme mellem boligens rum (IES, 2008b).

ApacheHVAC er et modul som udvider ApacheSim med muligheden for detaljeret at modellere bygningers ventilations-, opvarmnings- og kølesystemet. Ventilationssystemet kan modelleres på komponent niveau og det er muligt at implementere avancerede og mere realistiske reguleringsystemer. I modellen anvendes ApacheHVAC til at modellere det balancerede ventilationssystem (IES, 2008c).

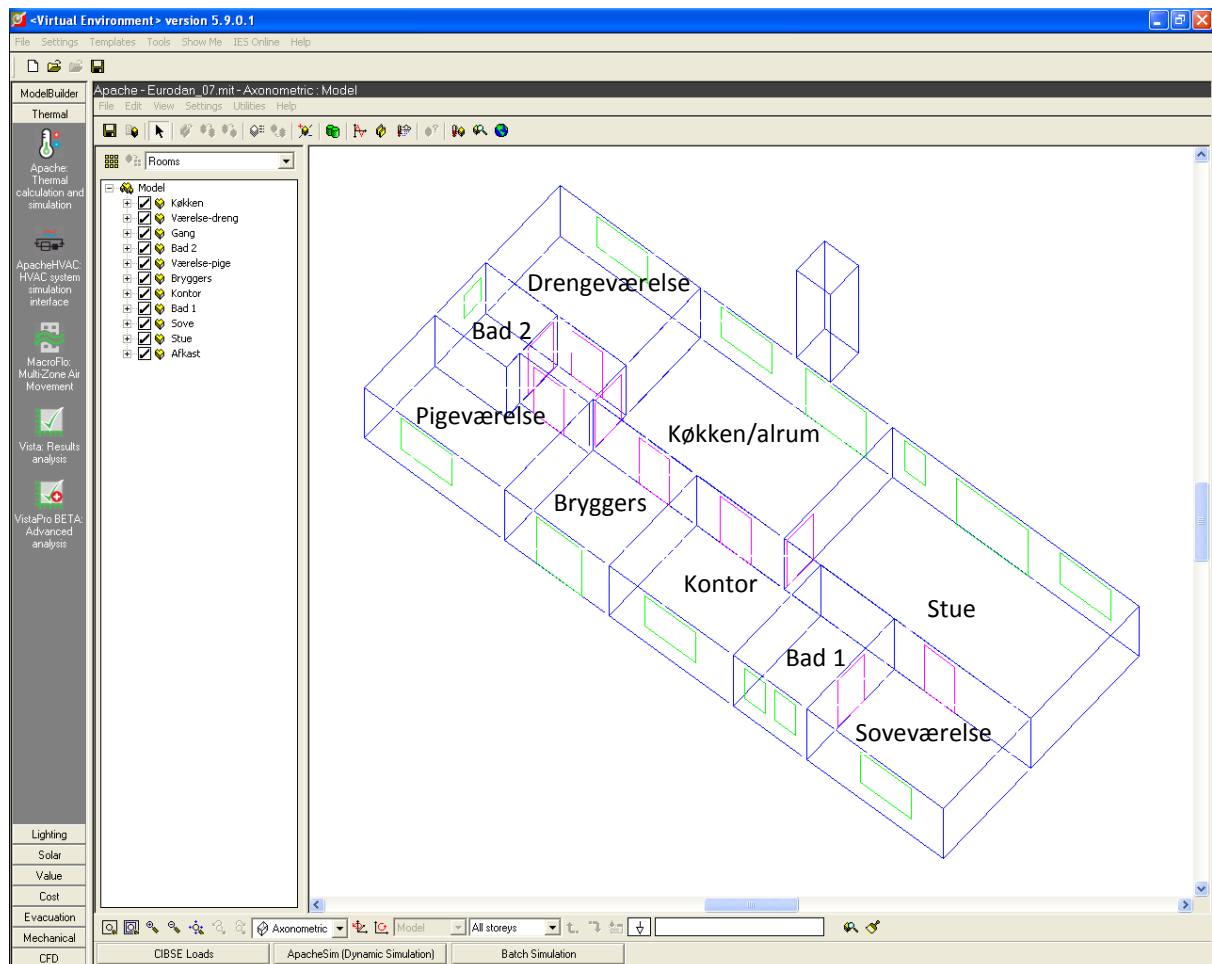
5.1 Model af forsøgshus og brugsmønstre

Den geometriske model er opbygget på baggrund af en plantegning af boligen (se figur 12). Konstruktionernes opbygning er skønnet ud fra type og byggeår. Formålet med projektet er at undersøge forskellige ventilationsstrategiers indflydelse på det atmosfæriske indeklima (fugt og CO₂). Derfor er klimaskærmens termiske egenskaber i modellen ikke så væsentlige. Boligen indeholder to børneværelser, kontor, soveværelse, stue, køkken/alrum, bryggers og to badeværelser. Desuden er modelleret et fiktivt rum, der giver mulighed for at registrere tilstande for den samlede udsugede luftmængde, som den ville blive registreret i ventilationsaggregatet. Modellen i programmet er vist i figur 13 påført rumbetegnelser.

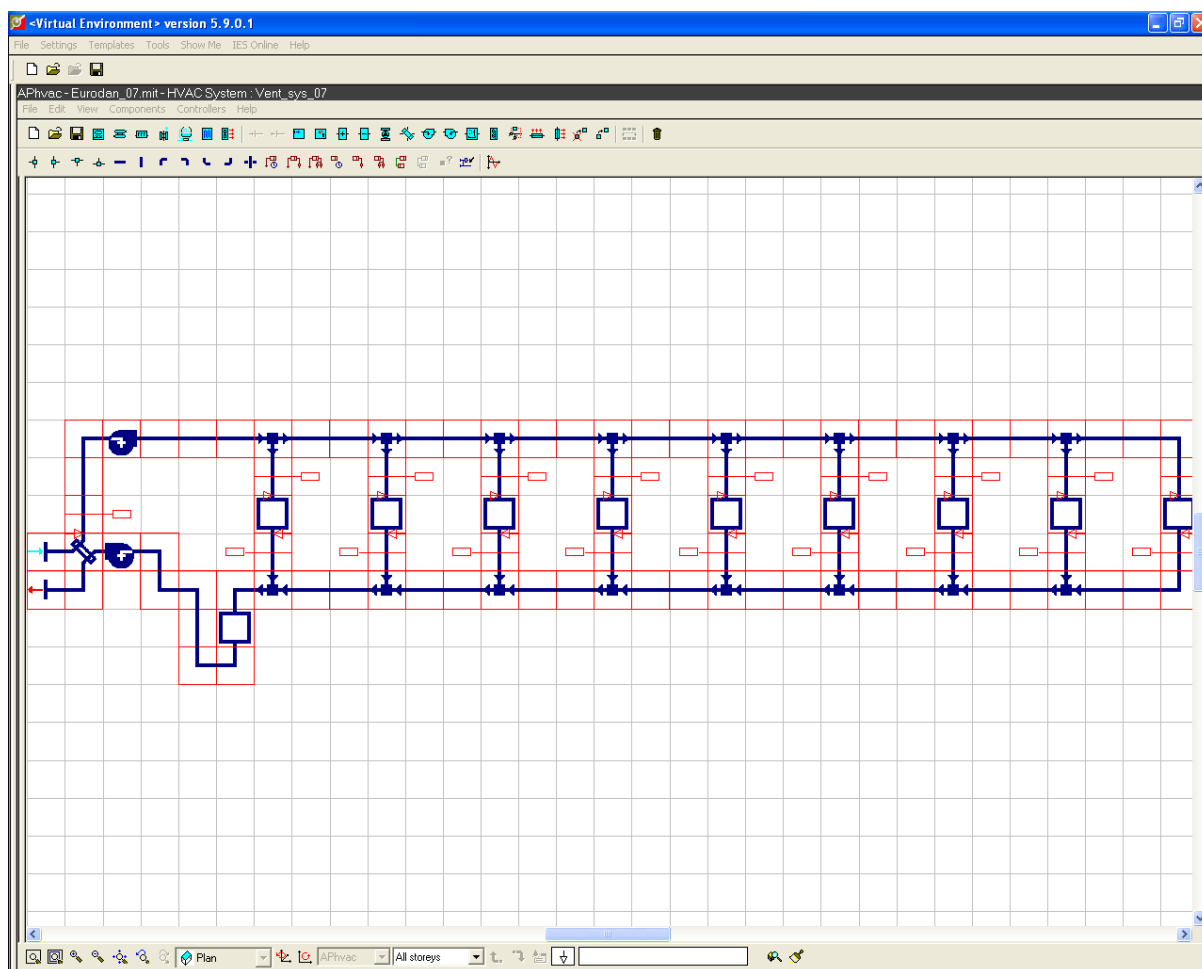
Såfremt andet ikke er angivet ventileres boligen i de følgende simuleringer udelukkende gennem det mekaniske ventilationssystem og en konstant infiltration. Dette er valgt for at isolere effekten af styringsstrategierne for CO₂ og fugt uden en indflydelse fra en regulering af rumtemperaturen gennem en udluftningsstrategi.

Det mekaniske ventilationssystem er modelleret med udsugning i køkken, badeværelser og bryggers og indblæsning i stue, kontor og værelser. Modellen af det mekaniske ventilationssystem er udført i ApacheHVAC og er vist i figur 14. De firkantede kasser repræsenterer hvert rum forbundet med kanaler til indblæsnings- og udsugningsventilator. Et fiktivt rum er indført lige før udsugningsventilatoren for at kunne anvende tilstandene for den blandede udsugningsluft lige før aggregatet. Modellen kræver indblæsning og udsugning tilknyttet hvert rum. For at opnå at der kun er enten indblæsning eller udsugning i rummet, er ventilationsmængden reguleret i både

indblæsning og udsugning. I rum kun med indblæsning er den udsugede luftmængde sat til nul og i rum kun med udsugning er den indblæste luftmængde sat til nul. For at luften kan strømme mellem rummene antages dørene at være åbne og de interne luftbevægelser beregnes i programmoduler MacroFlo. I modelleringen er styringsstrategierne defineret således, at der altid er balance mellem den indblæste og udsugede luftmængde for hele boligen.



Figur 13 Geometrisk model af boligen i IES VE påført rumbetegnelser.

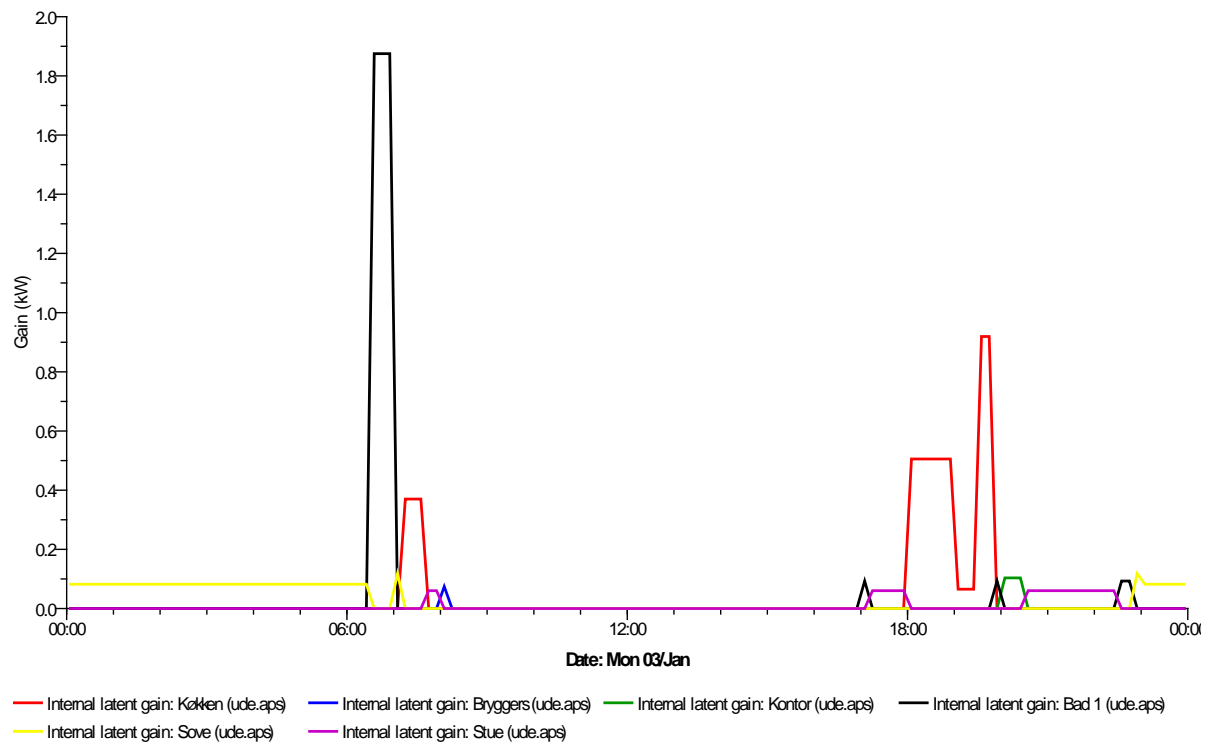


Figur 14 ApacheHVAC-model af boligens ventilationssystem.

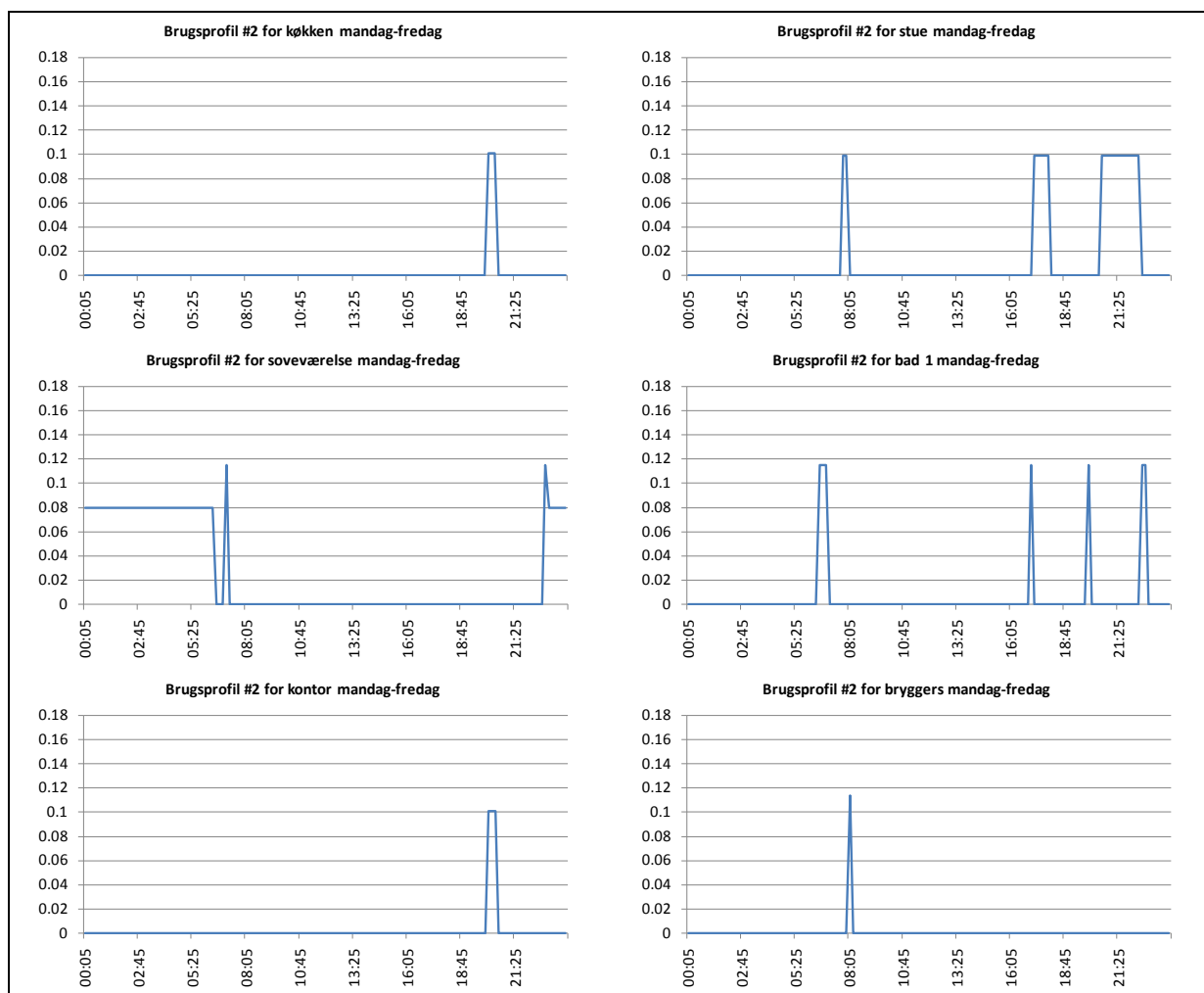
5.1.1 Brugsmønster lav belastning

Ved lav belastning antages at huset kun bebos af én person. I denne situation står de to børneværelser ubenyttede. Det er ikke muligt at rapportere CO₂- og fugtbelastningen fra personer direkte fra programmet. CO₂-produktionen er knyttet til personlasten og fugtproduktionen udtrykkes ved den latente varmelast.

Figur 15 viser den samlede latente varmelast fra personer og andre kilder og Figur 16 viser den sensible personlast i kW for de enkelte rum anvendt i simuleringen for hverdage. Udover fugtbelastning fra personer er medtaget fugtbelastninger fra badning og madlavning i baderum og køkken. I bilag 1 er gengivet belastninger for lørdage og søndage.



Figur 15. Den latente varmebelastning på hverdage i de enkelte rum når huset bebos af én person.

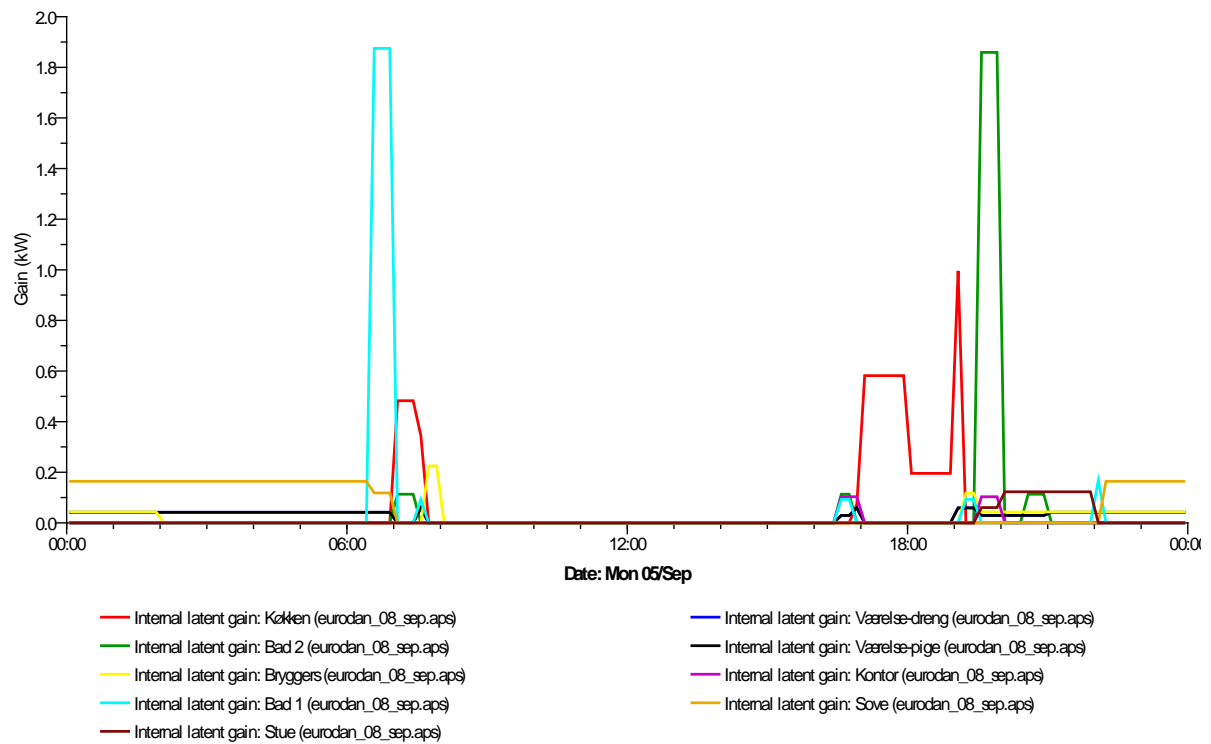


Figur 16. Personlasten i kW på hverdage i de enkelte rum når huset bebos af én person.

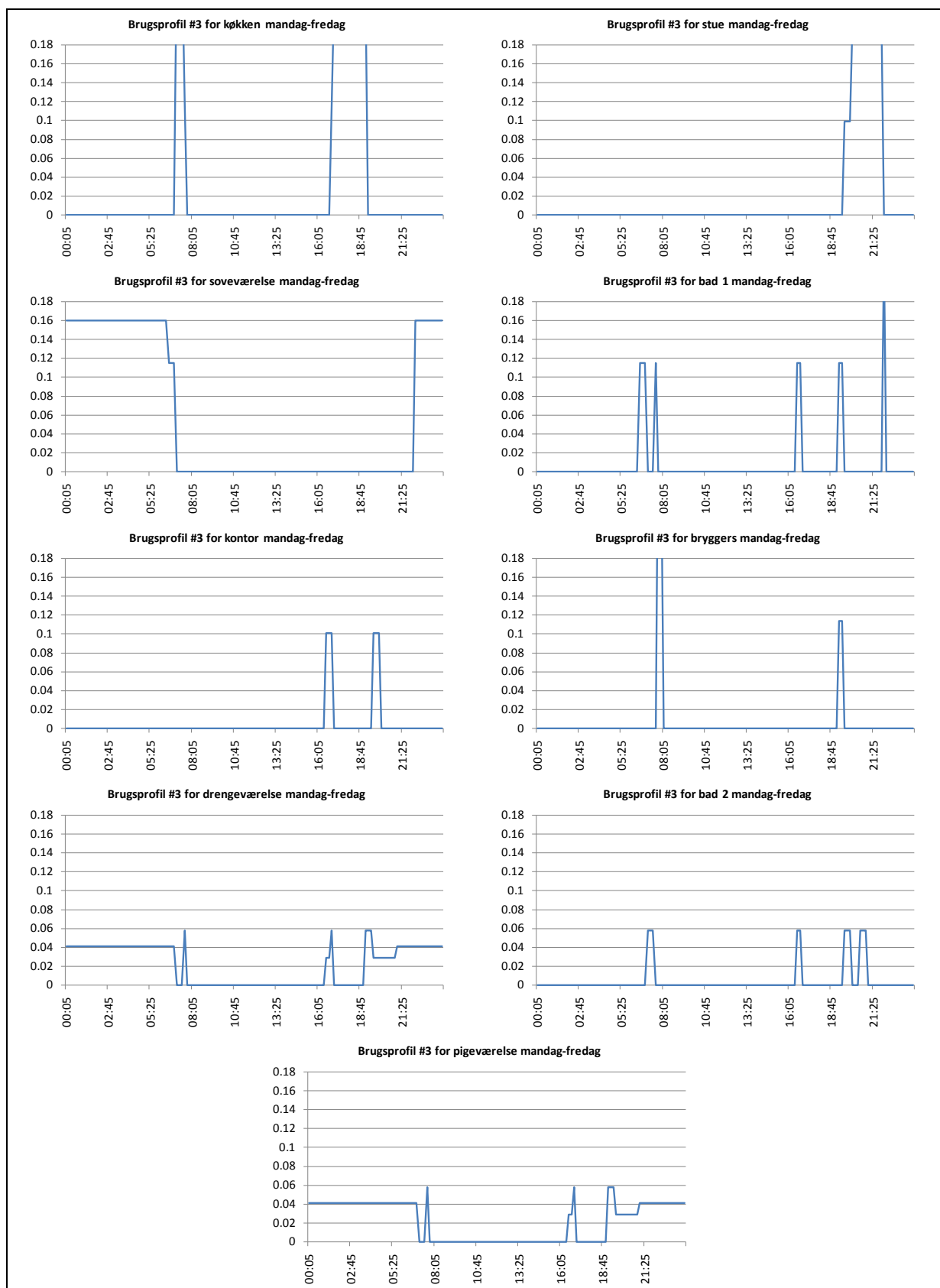
5.1.2 Brugsmønster høj belastning

Ved høj belastning antages huset beboet af to voksne og to børn. Det er ikke muligt at rapportere CO₂- og fugtbelastningen fra personer direkte fra programmet. CO₂-produktionen er knyttet til personlasten og fugtproduktionen udtrykkes ved den latente varmebelastning.

Figur 17 viser den samlede latente varmebelastning fra personer og andre kilder og Figur 18 viser den sensible personlast i kW for de enkelte rum anvendt i simuleringen for hverdage. Udover fugtbelastning fra personer er medtaget fugtbelastninger badning og madlavning i baderum og køkken. I bilag 1 er gengivet belastninger for lørdage og søndage.



Figur 17. Den latente varmebelastning på hverdage i de enkelte rum når huset bebos af to voksne og to børn.



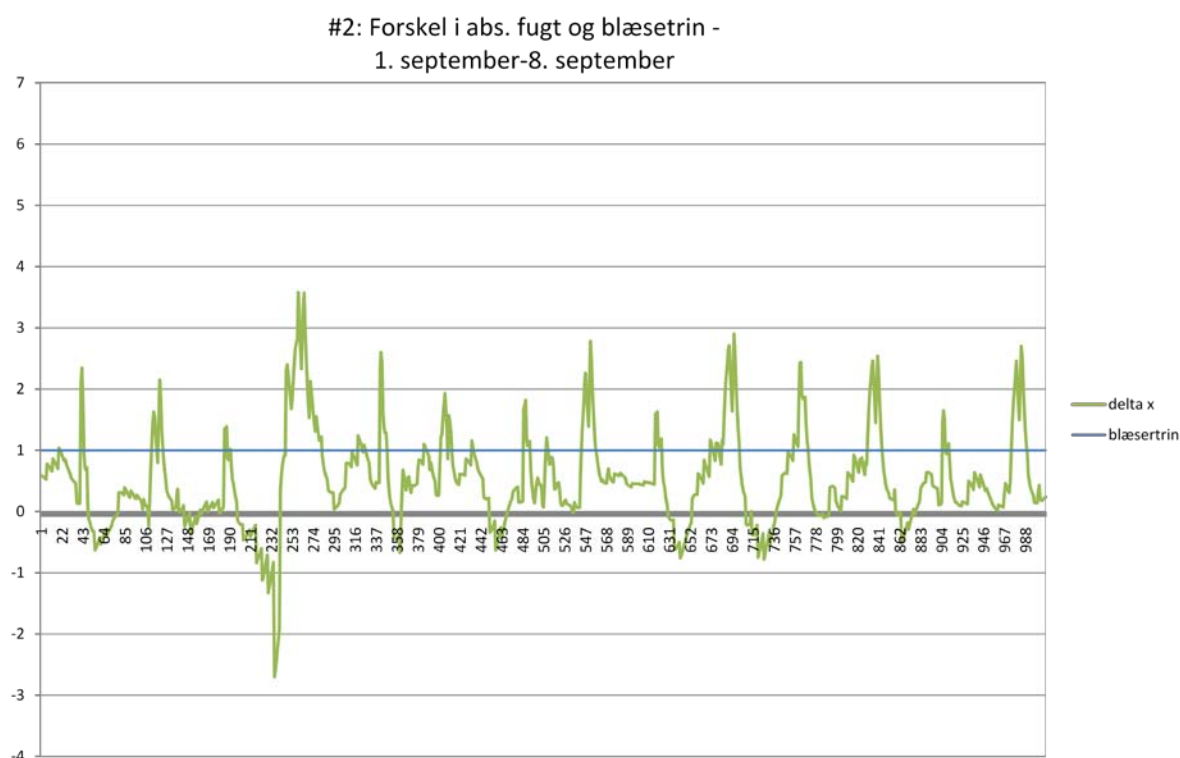
Figur 18. Personlasten i kW på hverdage i de enkelte rum når huset bebos af to voksne og to børn.

5.2 Resultater med konstant ventilationsrate

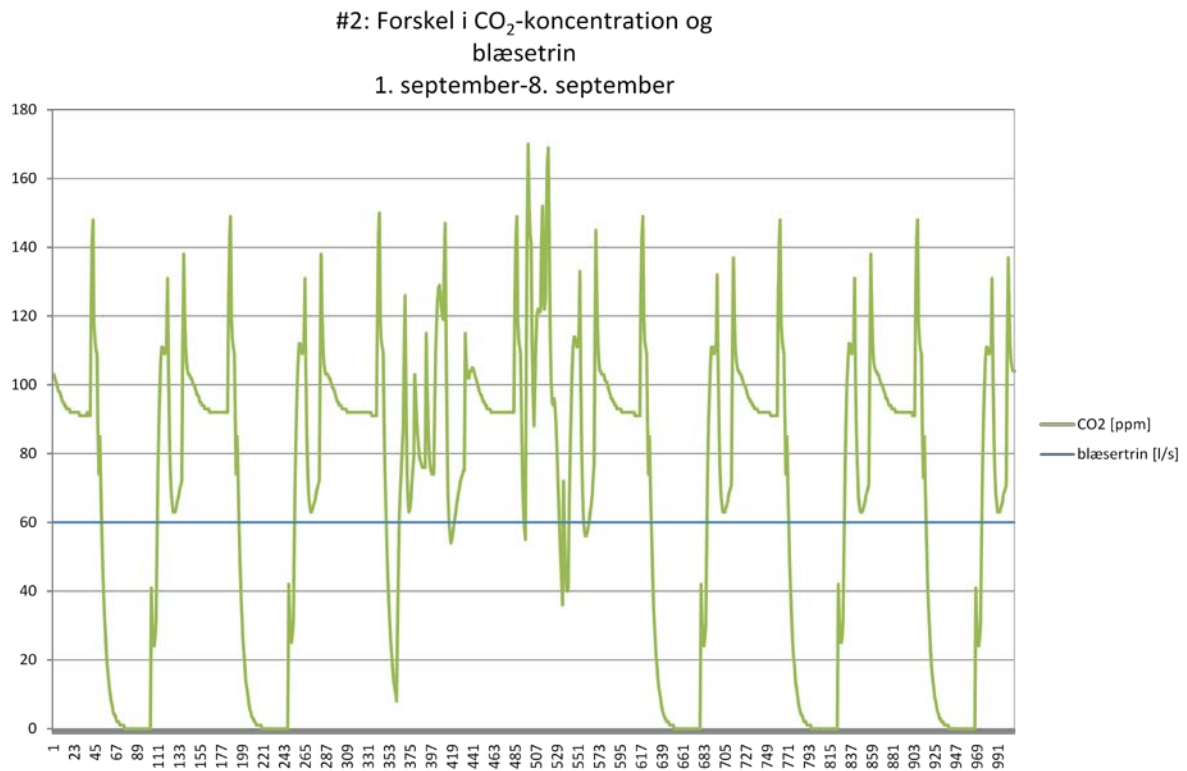
Huset ventileres med konstant luftstrøm på 216 m³/h fordelt på de enkelte rum som angivet i kapitel 4, hvilket svarer til kravet i Bygningsreglementet (EBST, 2008).

Figur 19 til figur 22 viser forskellen i absolut fugtighed og CO₂-koncentrationen mellem udsugningsluft og udeluft for forsøgshuset med lav og høj personbelastning med en konstant ventilation svarende til kravet i Bygningsreglementet. Beregningerne med lav belastning viser, at forskellen i CO₂-koncentration bliver meget lille (ofte under 100 ppm), hvilket kan medføre at en regulering baseret på forskellen i CO₂-koncentration ikke aktiverer ventilationen, da der er nogen usikkerhed på CO₂-målingen. Ved den høje belastning bliver forskellen i CO₂-koncentration sjældent lavere end 200 ppm når der er personer i bygningen, hvilket burde være til at registrere.

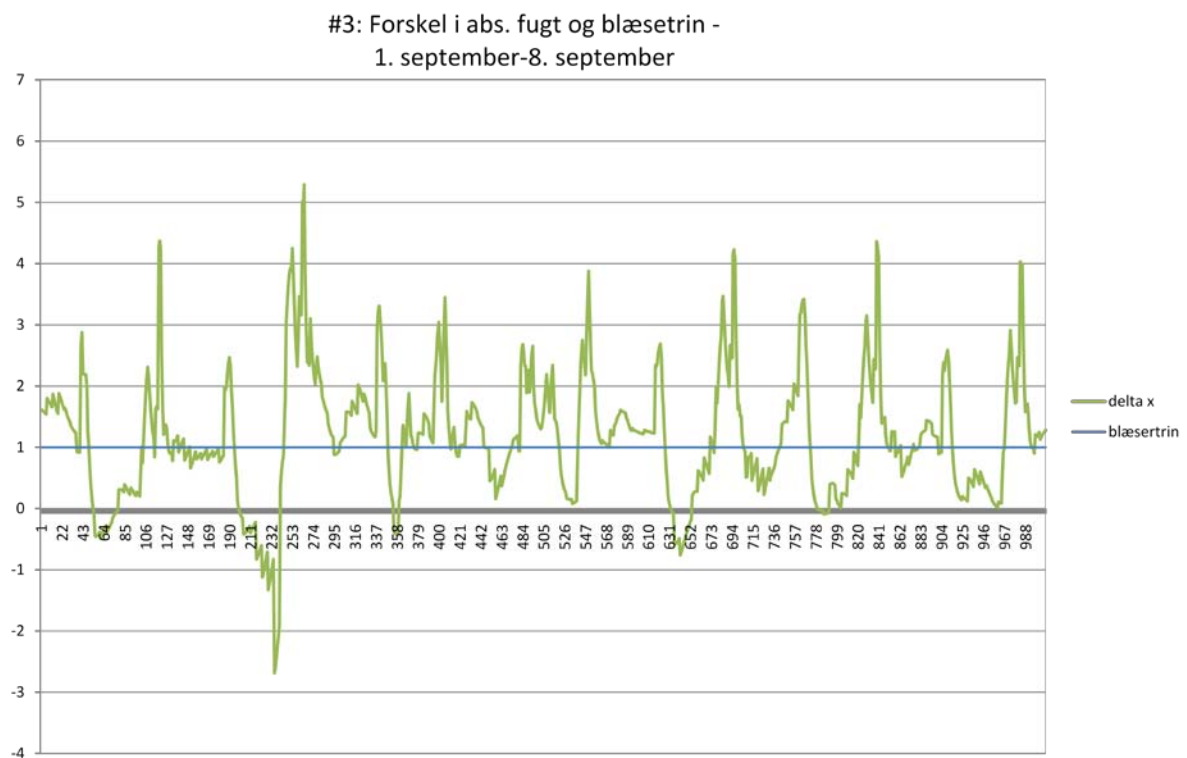
Ved begge belastninger holdes forskellen i absolut fugtighed det meste af tiden under 2 g/kg.



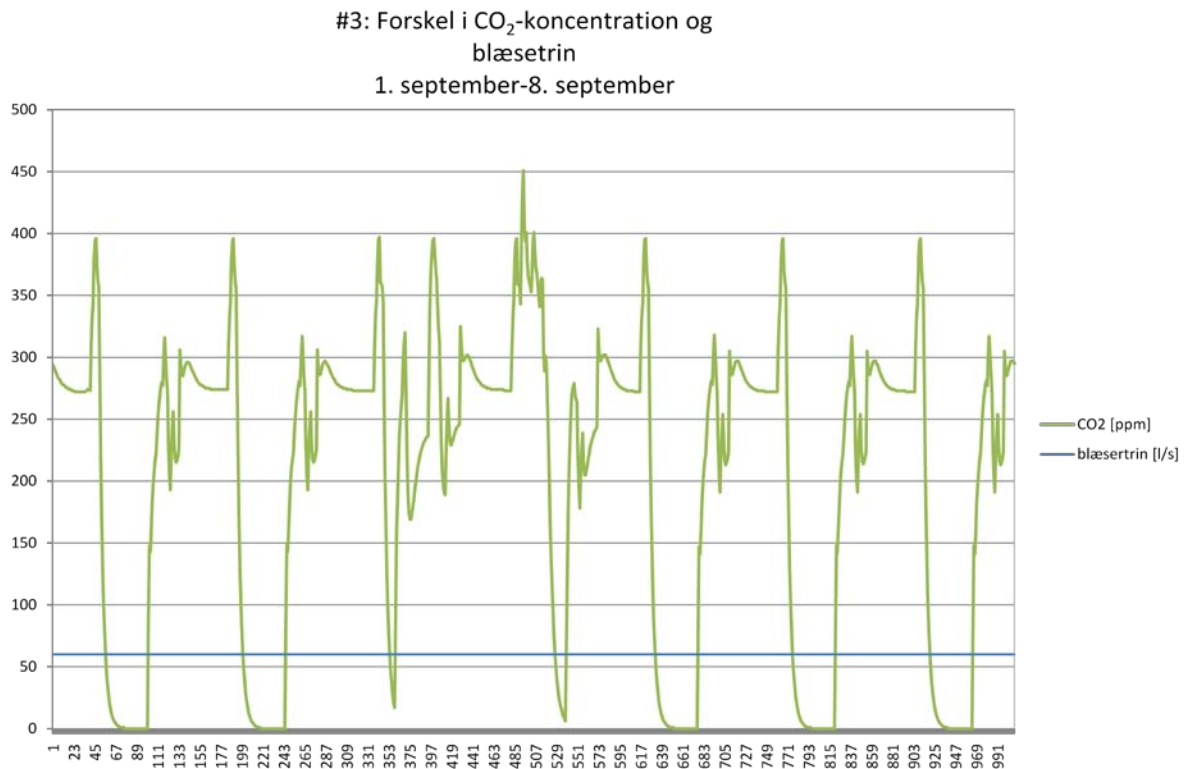
Figur 19. Forskel i absolut fugtighed mellem inde og ude ved lav belastning og konstant ventilation.



Figur 20. Forskel i CO₂-koncentration mellem inde og ude ved lav belastning og konstant ventilation.



Figur 21. Forskel i absolut fugtighed mellem inde og ude ved høj belastning og konstant ventilation.



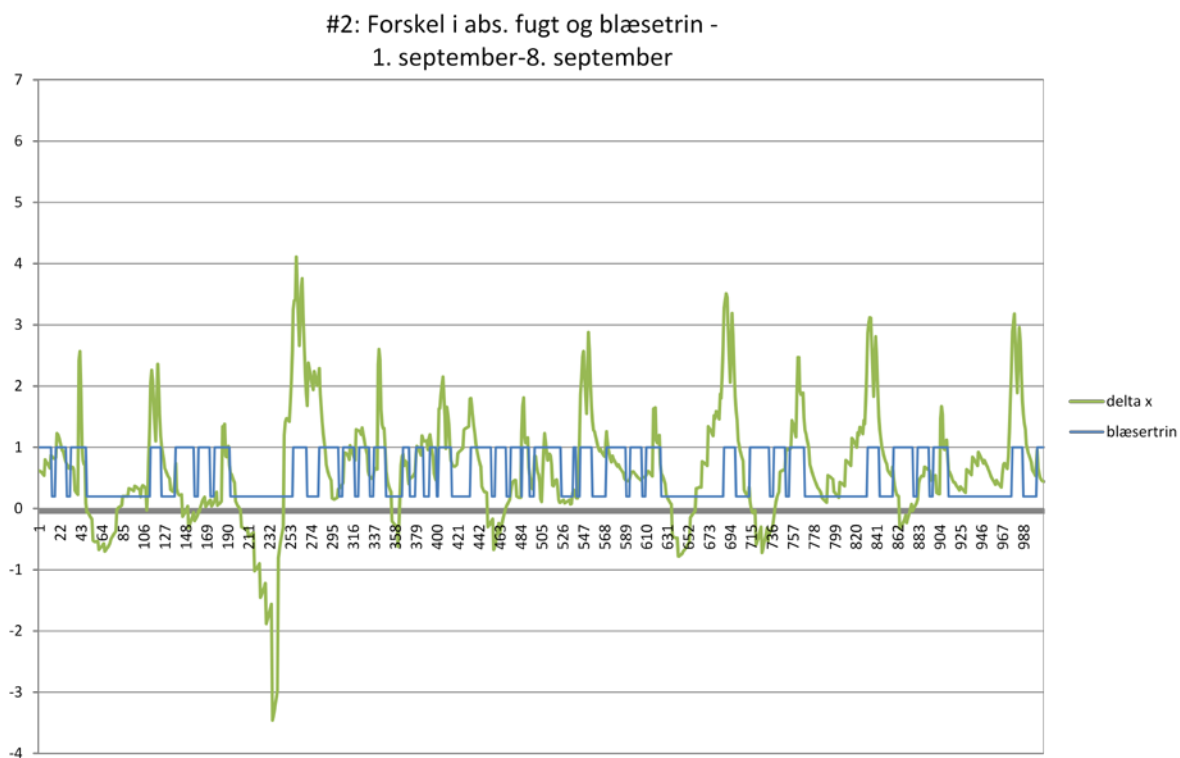
Figur 22. Forskel i CO₂-koncentration mellem inde og ude ved høj belastning og konstant ventilation.

5.3 Simpel reguleringsstrategi

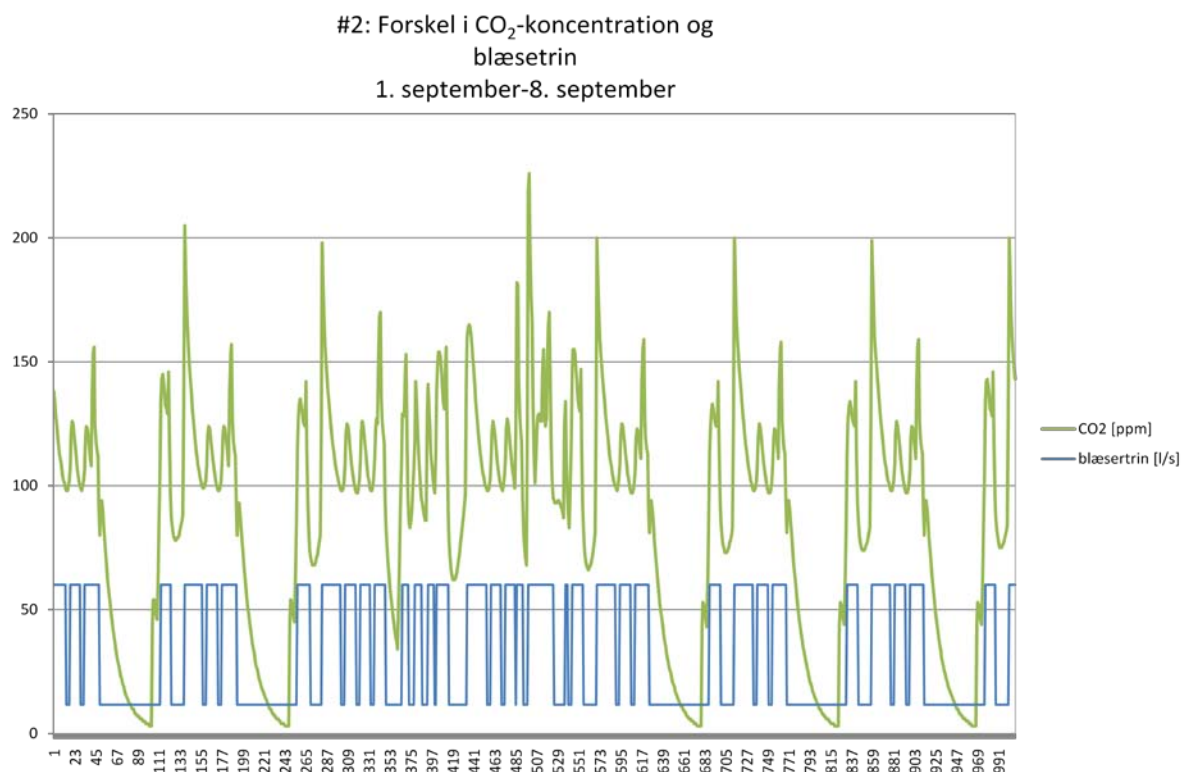
Figur 23 til Figur 26 viser forskellen i absolut fugtighed og CO₂-koncentrationen mellem udsugningsluft og udeluft for forsøgshuset med lav og høj personbelastning med luftmængder som beskrevet i afsnit 3.1. Den simple reguleringsstrategi er simuleret således at det høje trin aktiveres hvis forskellen i CO₂-koncentrationen mellem udsugningsluften og udeluften overstiger 100 ppm eller hvis forskellen i absolut fugtighed mellem udsugningsluften og udeluften overstiger 2 g/kg.

Det ses af resultaterne for begge belastninger, at det er forskellen i CO₂-koncentrationen, der er afgørende for om ventilatoren kører på det høje eller lave trin. Der er ingen eller kun meget korte perioder hvor forskellen i absolut fugtighed overstiger 2 g/kg samtidig med at forskellen i CO₂-koncentration er lavere end 100 ppm.

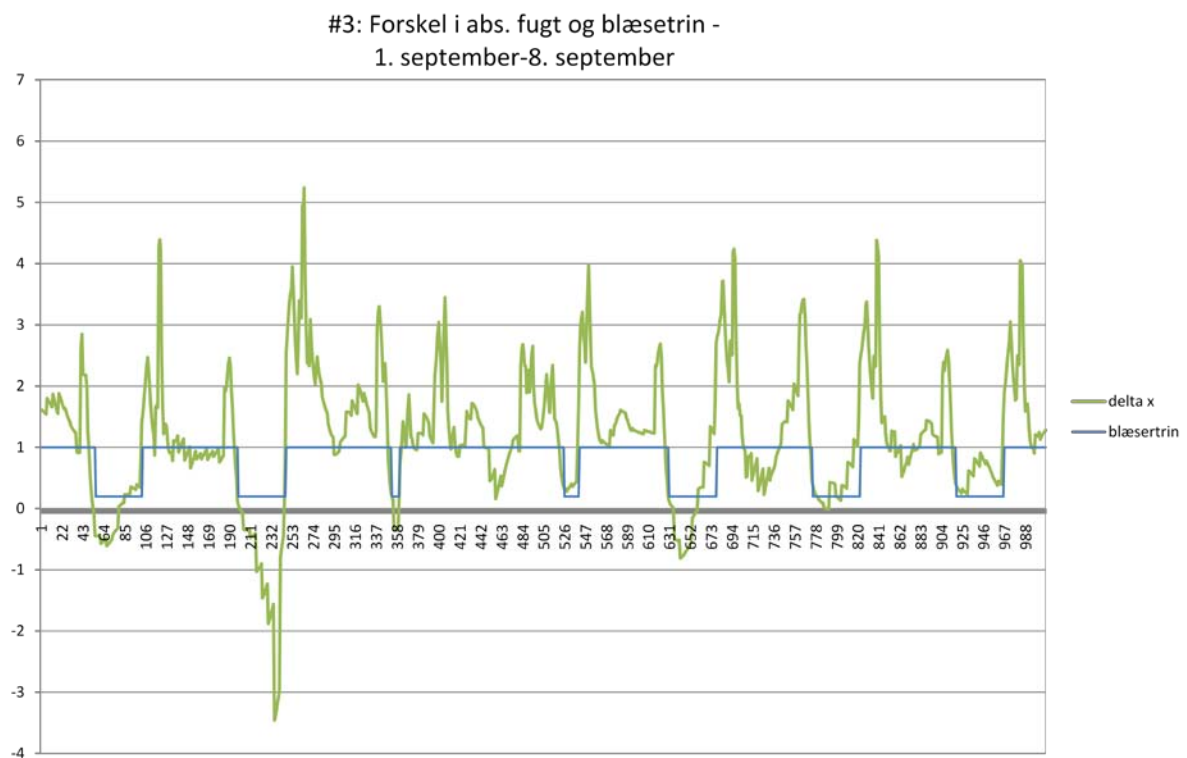
Desuden ses, at udviklingen i CO₂-koncentration og absolut fugtighed ikke adskiller sig væsentligt fra situationen med konstant luftskifte. Kun i situationen med lav belastning ses en mindre stigning i CO₂-koncentrationen, da de meget lave koncentrationer resulterer i at ventilationen meget ofte kører på det lave trin. Det konkluderes derfor, at beregningerne viser at det atmosfæriske indeklima ikke forværres af den simple behovstyring, når atmosfærisk indeklima udelukkende vurderes på baggrund af CO₂-koncentration og fugtighed. Ved den høje belastning kører ventilatoren ca. 25 % af tiden på det lave trin.



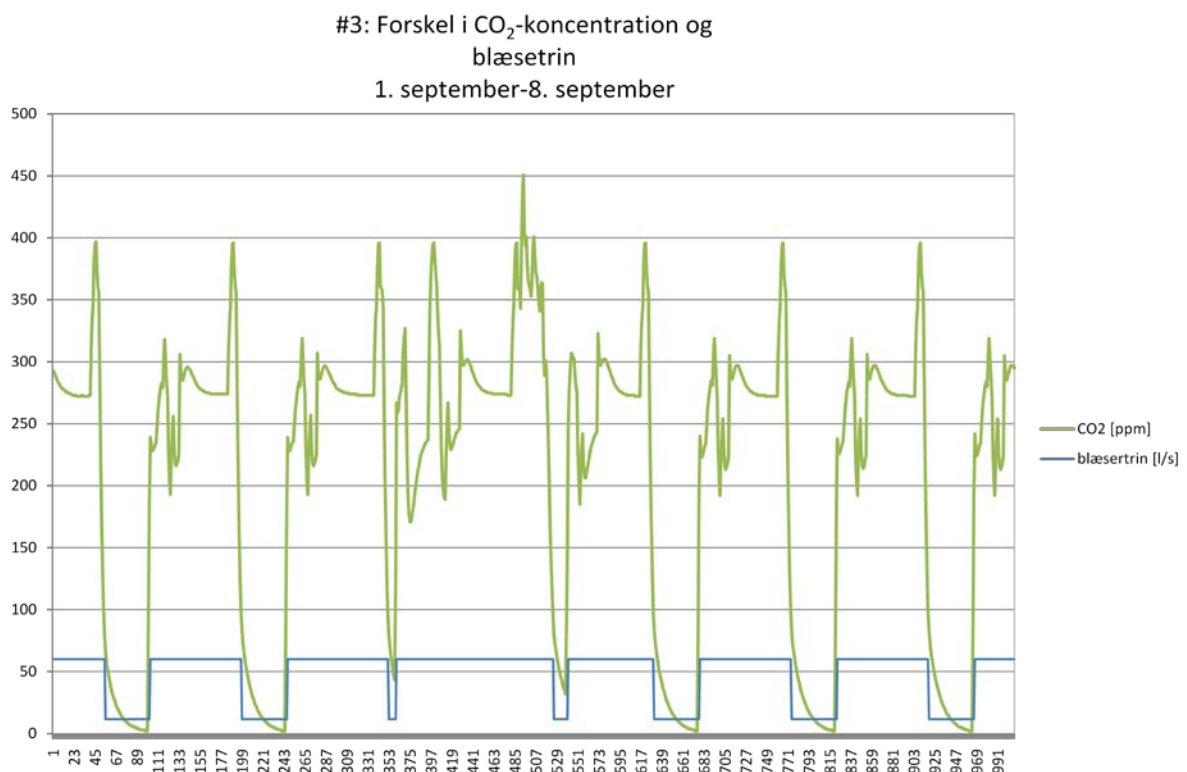
Figur 23. Forskel i absolut fugtighed mellem inde og ude ved lav belastning og simpel behovstyret ventilation.



Figur 24. Forskel i CO₂-koncentration mellem inde og ude ved lav belastning og simpel behovstyret ventilation



Figur 25. Forskel i absolut fugtighed mellem inde og ude ved høj belastning og simpel behovstyret ventilation



Figur 26. Forskel i CO₂-koncentration mellem inde og ude ved høj belastning og simpel behovstyret ventilation

5.4 Avanceret reguleringsstrategi

Den avancerede reguleringsstrategi er ikke simuleret, da det ikke med det anvendte beregningsprogram var muligt at sikre luftbalance i det mekaniske ventilationssystem når indblæsningens størrelse reguleres efter rummernes CO_2 -koncentration. I det følgende er set på hvilket betydning dørenes åbningsgrad har på CO_2 -koncentration i boligens rum.

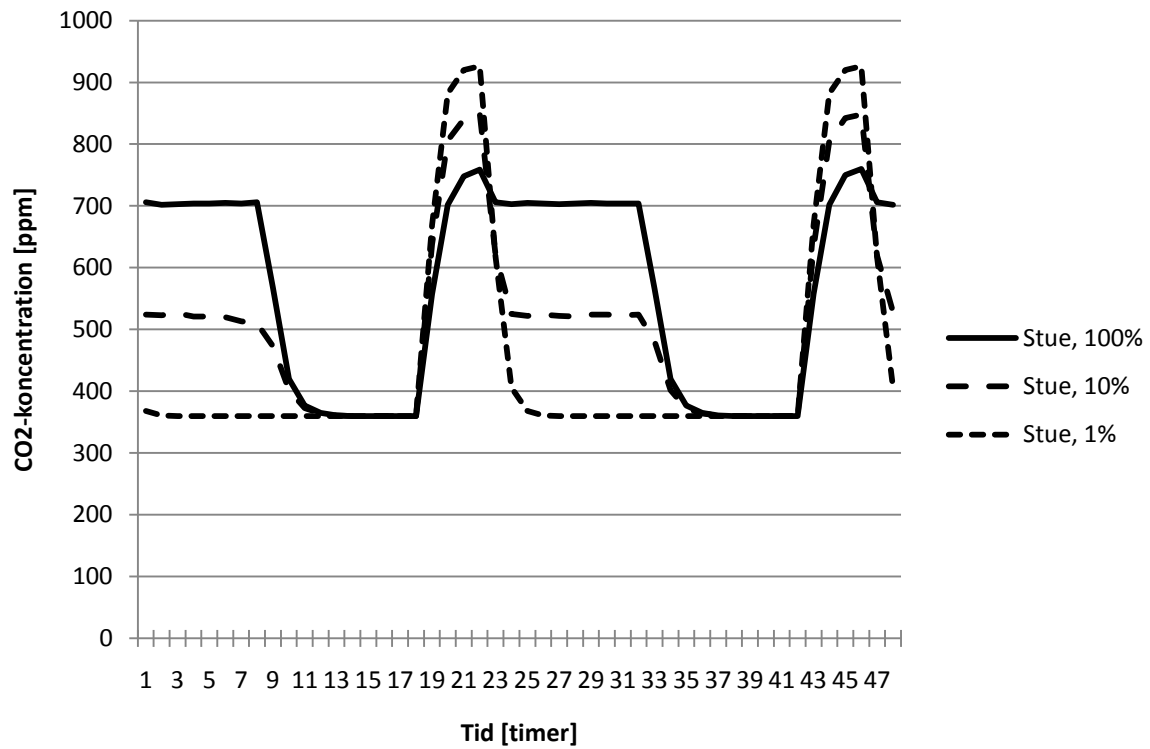
5.4.1 Betydning af åbne eller lukkede døre

Døre mellem rummene i boligen kan stå mere eller mindre åbne. I det følgende vurderes hvor stor betydning åbne eller lukkede døre mellem rummene har på opblandingen af luften i boligen. Det forventes, at åbne døre mellem rummene vil medføre en væsentlig opblanding, som medvirker til at reducere CO_2 -koncentrationen i de belastede rum og øger CO_2 -koncentrationen i ikke belastede rum. Hvis opblandingen er meget stor, vil CO_2 -koncentrationen i rummene blive meget ens, og kan medvirke til at regulering efter CO_2 -koncentrationen på rumniveau ikke har den ønskede virkning.

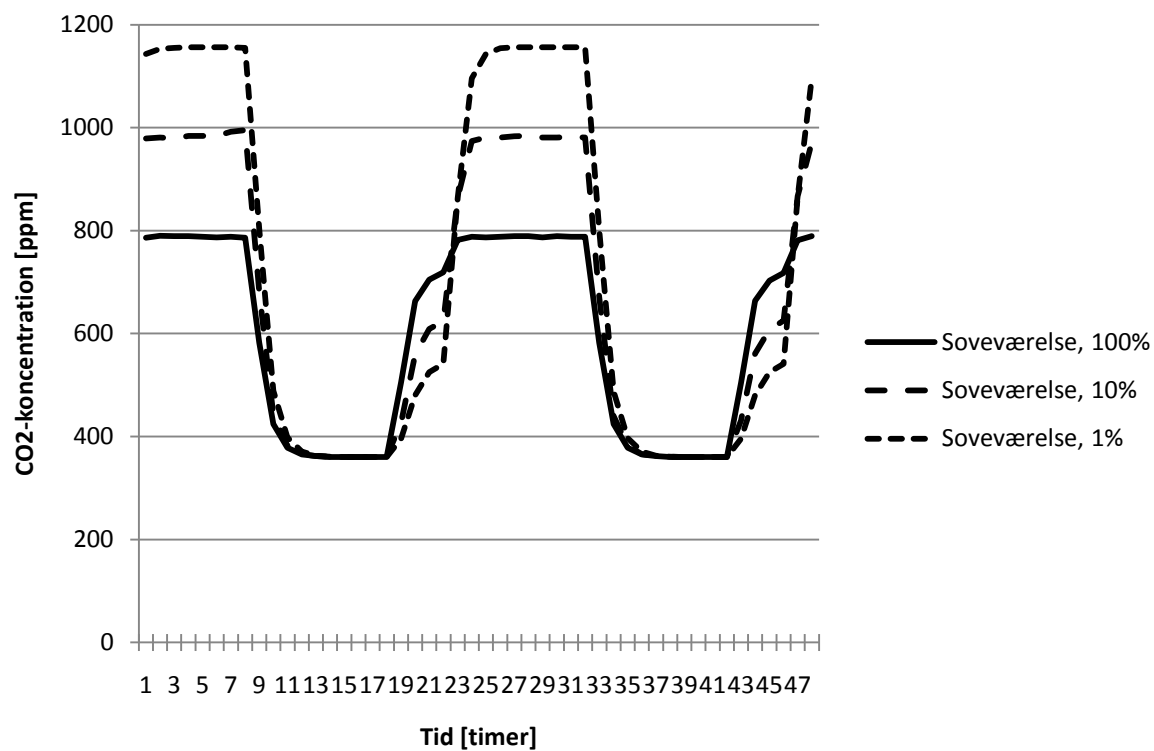
I det følgende betragtes en del af boligen bestående af stuen og soveværelset, som er i forbindelse med hinanden via en dør. Der beregnes for en situation hvor 2 personer som opholder sig i stuen kl. 18 til 22 og derefter i soveværelset fra kl. 22 til 8. Udenfor disse tidsrum er der ingen personer i lokalerne. Der anvendes luftstrømme som dimensioneret i husets eksisterende ventilationssystem uden mulighed for regulering. Stuen tilføres 21 l/s friskluft og soveværelset tilføres 10 l/s friskluft. Fra soveværelset udsuges 15 l/s gennem badeværelset og fra stuen overføres 16 l/s til køkken. Det medfører en nettoluftstrøm på 5 l/s gennem døren fra stuen til soveværelset. Afhængig af dørens åbningsgrad vil der være større eller mindre tilfældig luftudveksling mellem stuen og soveværelset, som medfører en opblanding af luften mellem de to rum. Det antages, at dørhullet har bredde 1 m og højde 2,3 m. Resultater præsenteres for forskellige åbningsgrader af døren, hvor døren står helt åben ved åbningsgrad 100% og simuleres lukket med åbningsgrad på 1%. Tabel 3 viser bruttoluftstrømme og nettoluftstrømmen mellem stuen og soveværelset med forskellig åbningsgrad af døren. Ved helt åben dør ses en stor tilfældig luftudveksling mellem rummene, som medfører stor opblanding af luften mellem de to rum. Med næsten lukket dør er der kun en luftstrøm fra stuen mod soveværelset. Figur 27 og Figur 28 viser den beregnede CO_2 -koncentration i stuen og soveværelset for forskellige åbningsgrader af døren mellem rummene. Med den store åbningsgrad ses en stor opblanding mellem rummene, hvilket medfører væsentlig forhøjet CO_2 -koncentration i soveværelset i tidsrummet kl. 18 til 22 selvom ingen personer opholder sig i soveværelset i det tidsrum. Med lukket dør ses ingen opblanding mellem rummene, hvilket medfører, at udviklingen i CO_2 -koncentration i rummene følger personbelastningen, og at CO_2 -koncentrationerne i rummene når højere maksimalværdier, da belastningen ikke som med åben dør udjævnes over flere rum via tilfældig luftudveksling. Det må konkluderes, at regulering på baggrund af den målte CO_2 -koncentration i de enkelte rum er følsom overfor de tilfældige luftstrømme, der er mellem rummene gennem åbne døre. Med helt åbne døre, er opblandingen så stor, at det bliver svært at vurdere i hvilket rum kilden befinder sig, da CO_2 -koncentrationen bliver næsten ens i boligen.

Tabel 3. Luftstrømme i middel for perioden gennem døren fra stuen til soveværelset

Åbningsgrad	Stue til soveværelse [l/s]	Soveværelse til stue [l/s]	Netto [l/s]
1%	5	0	5
10%	12,4	7,4	5
100%	85,5	80,6	4,9



Figur 27. CO₂-koncentration i stuen ved forskellig åbningsgrad af døren mod soveværelset. Tidsaksen starter kl. 0 og viser forløbet for to døgn.



Figur 28. CO₂-koncentration i soveværelset ved forskellig åbningsgrad af døren mod stuen. Tidsaksen starter kl. 0 og viser forløbet for to døgn.

6 Forhold i forsøgshuset før behovstyring

I den eksisterende bolig inden ombygning til behovstyring målt temperatur, relativ fugtighed og CO₂-koncentration i boligens rum og ved ventilationsaggregatet.

Figur 29 til Figur 32 viser måleresultater udført 12. til 20. februar 2008. Den 18. og 19. februar er målingerne foretaget med slukket ventilationsanlæg.

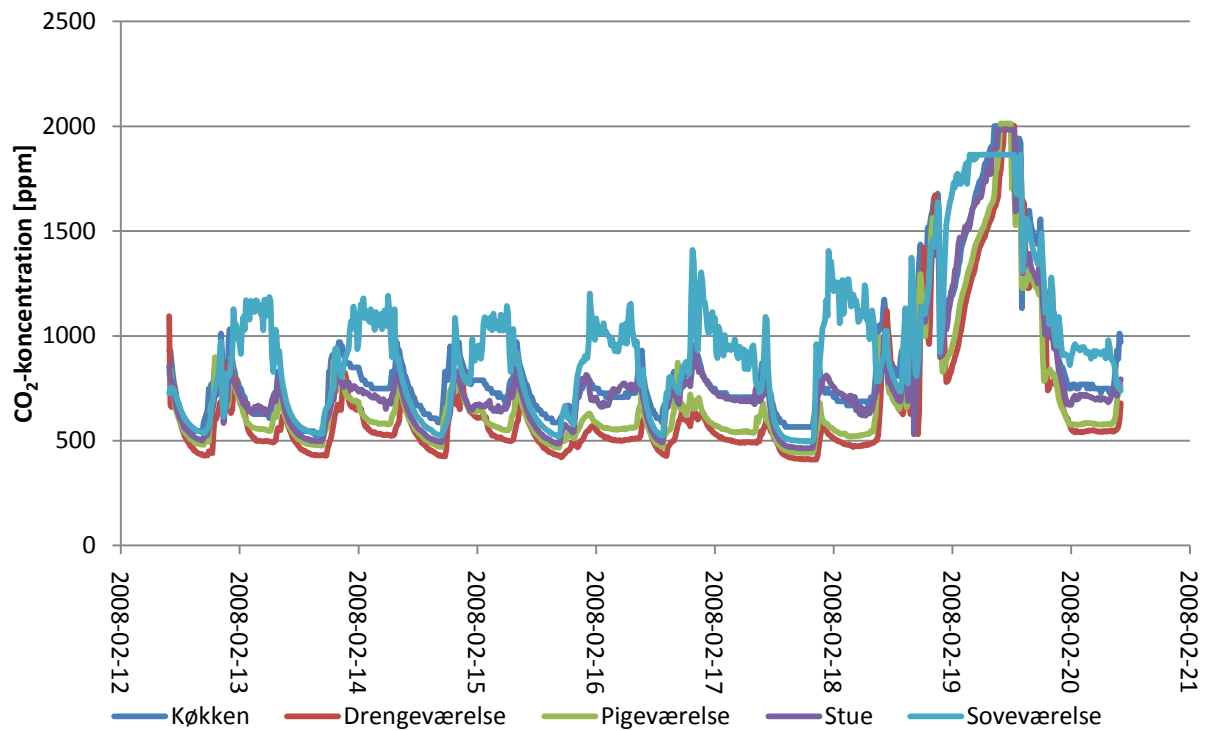
Målinger af CO₂-koncentrationen i Figur 29 viser som forventet en øget CO₂-koncentration i boligen når der er personer tilstede fra sidst på eftermiddagen til næste morgen. I dagtimerne hvor der er ikke er personer tilstede falder CO₂-koncentrationen i løbet af få timer til en koncentration nær udeluftens. I de fleste opholdsrum holdes CO₂-koncentrationen godt under 1000 ppm, som ofte benyttes som grænse for acceptabel luftkvalitet. Dog ses, at soveværelset er specielt belastet og i perioder har CO₂-koncentration over 1000 ppm i løbet af natten. Ikke overraskende viser målingerne med slukket mekanisk ventilation, at CO₂-koncentrationen stiger til uacceptabelt høje værdier, hvilket tydeligt viser vigtigheden af at den mekaniske ventilation er i drift.

Temperaturen i rummene vist i Figur 30 viser overraskende høje indetemperaturer. Boligen er opvarmet med gulvvarme og ventilationsanlægget regulerer ikke indblæsningstemperaturen. Der er dog til sommerdrift et bypass som fører ventilationsluften udenom varmeveksleren. Det vurderes, at regulering på luftstrømmen ikke vil have væsentlig indflydelse på rumtemperaturen medmindre indblæsningstemperaturen kan reguleres.

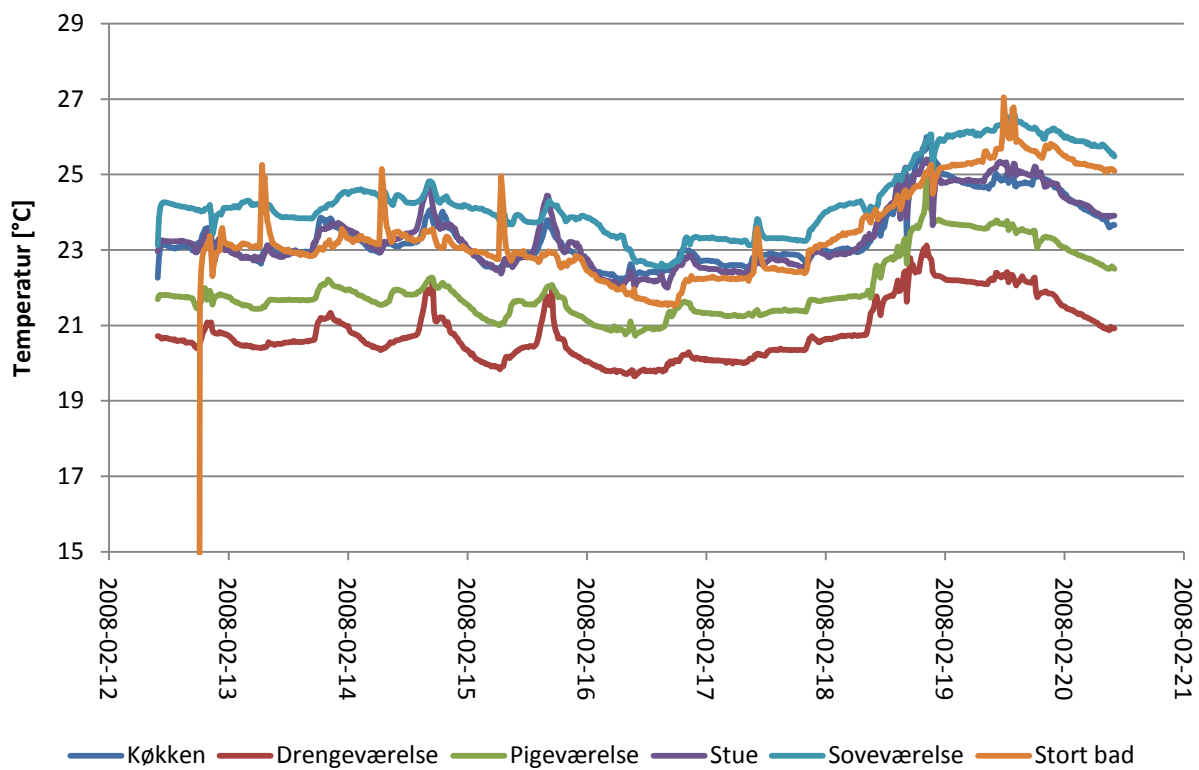
Målingerne er udført i en vinterperiode og det er derfor ikke overraskende at Figur 31 viser at den relative fugtighed i boligen er lav. I det store badeværelse tilknyttet soveværelset ses høj relativ fugtighed om morgenen, som skyldes badning. Den relative fugtighed falder dog hurtigt efter endt badning. I de andre rum ses ikke nogen kraftig variation i den relative fugtighed. Fugten fra morgenbadningen spreder sig ikke i væsentligt omfang til boligens andre rum, hvilket ses af at den relative fugtighed i naborummet (soveværelset) ikke stiger væsentligt pga. den høje fugtighed i badeværelset. Dette skyldes tildels, at udsugningen foretages fra en godt indkapslet brusekabine med badeforhæng helt til loftet og en sprække på ca. 50 mm ved gulvet. Den producerede vanddamp fjernes derved effektivt ved kilden inden den breder sig for meget i boligen.

Figur 32 viser forskellen mellem absolut fugtighed i udsugningsluften og udeluften. Forskellen i absolut fugtighed holder sig for det meste under den ønskede grænse på 2 g/kg. Om morgenen ses en øget fugtproduktion i boligen forbundet med morgenbadningen.

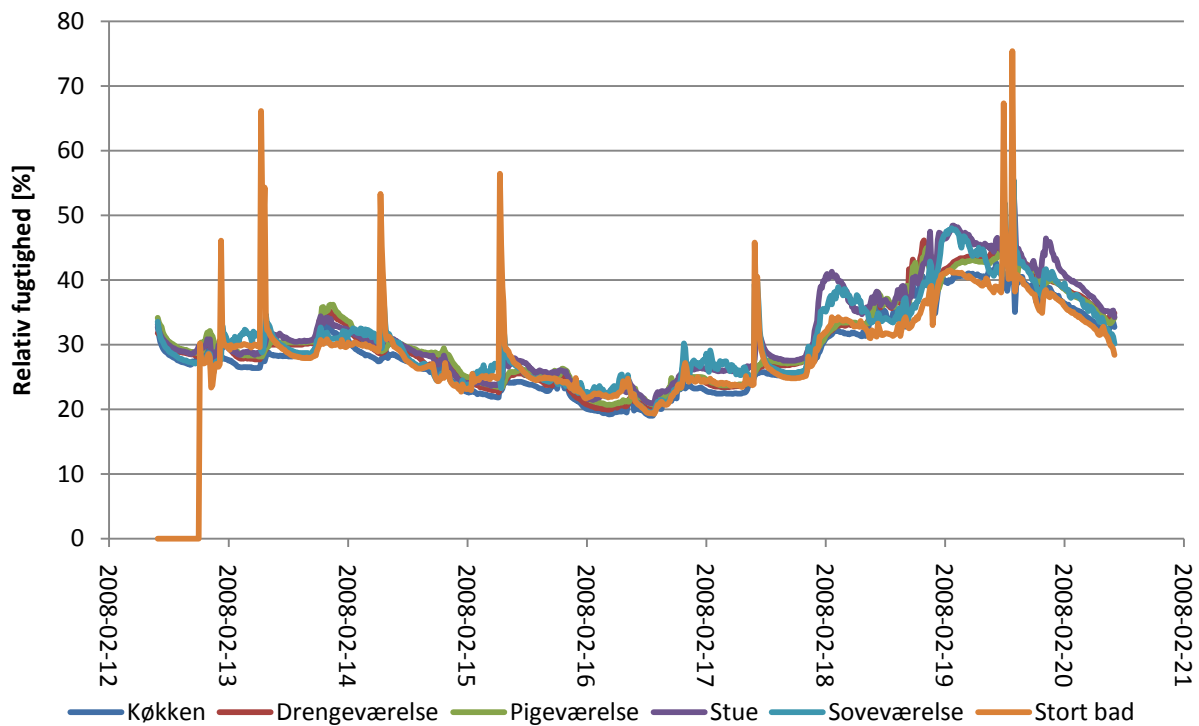
Generelt viser målingerne at det atmosfæriske indeklima udtrykt ved CO₂-koncentration og fugtighed holder sig indenfor de ønskede grænser. Måske med undtagelse af soveværelset, hvor CO₂-koncentrationen i løbet af natten overskrider den ønskede grænse på 1000 ppm.



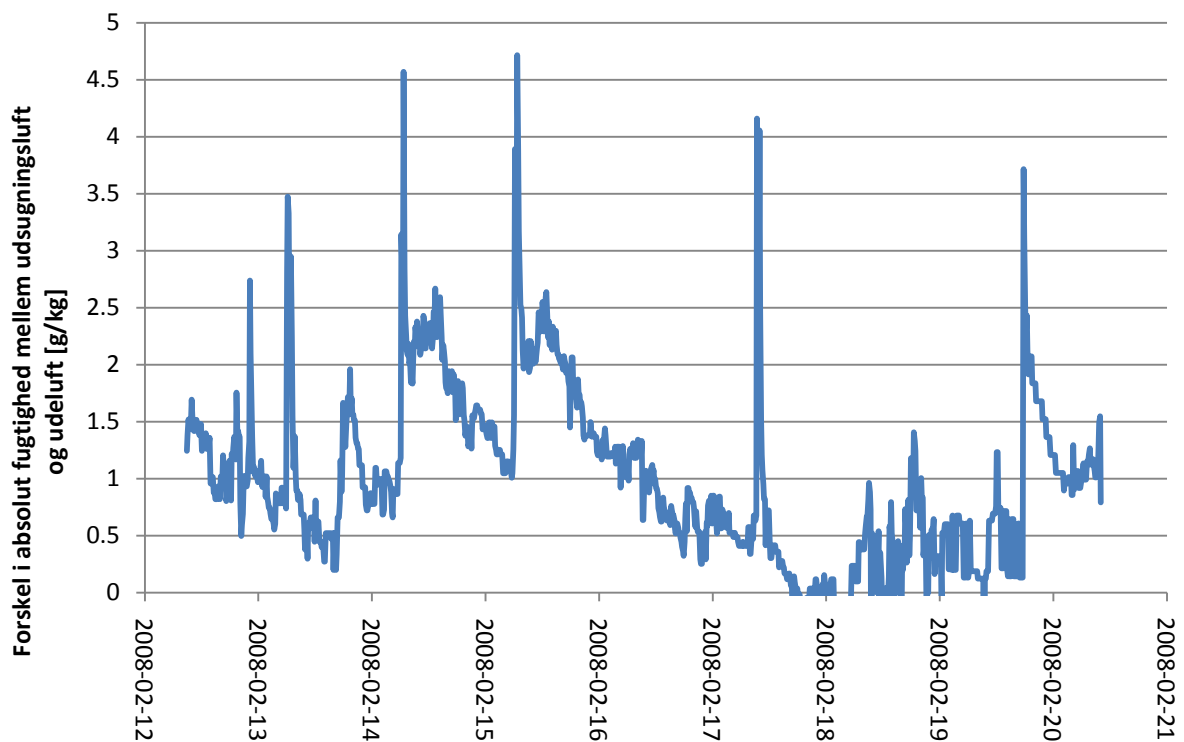
Figur 29. CO₂-koncentration i opholdsrum ved almindelig drift af ventilationsanlægget.



Figur 30. Temperatur i opholdsrum ved almindelig drift af ventilationsanlægget.



Figur 31. Relativ fugtighed i opholdsrum ved almindelig drift af ventilationsanlægget.



Figur 32. Forskel mellem absolut fugtighed i udsugningsluft og udeluft ved almindelig drift af ventilationsanlægget. Målingerne den 18. og 19. februar er ikke brugbare, da ventilationsanlægget er slukket.

7 Forhold i forsøgshuset med simpel reguleringsstrategi

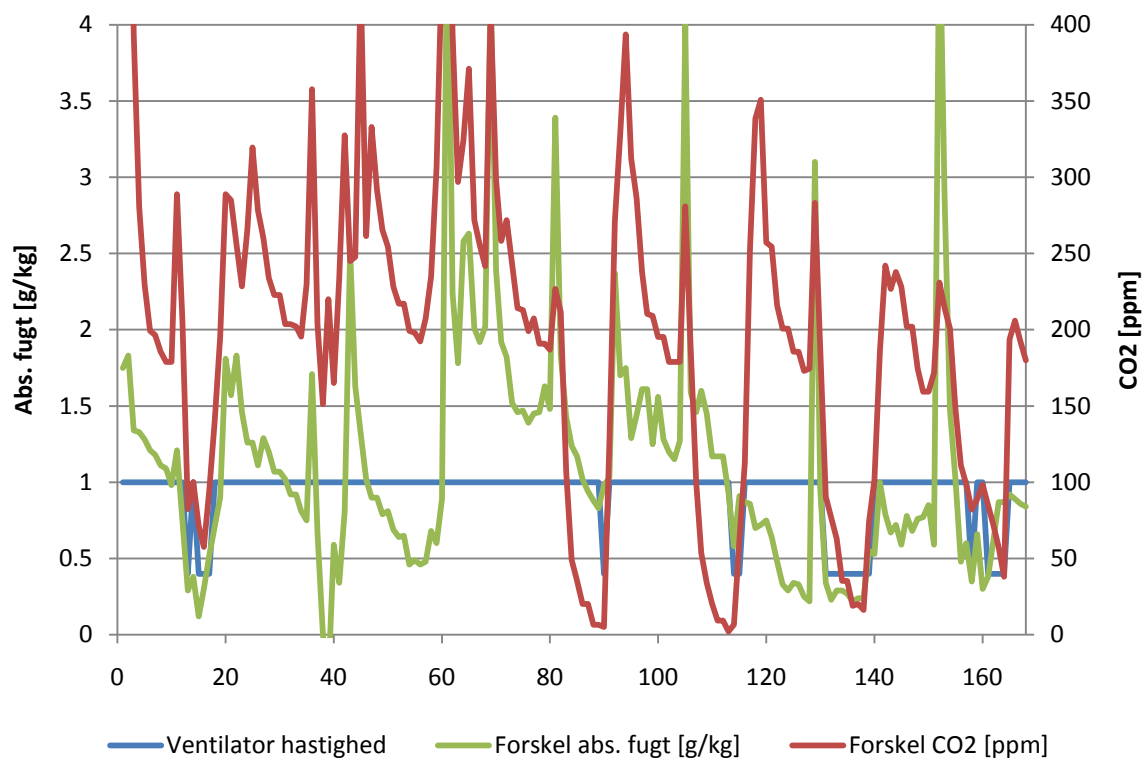
Målinger med den simple reguleringsstrategi er udført for fire situationer beskrevet i Tabel 4. Grænseværdier er valgt ud fra diskussionerne i afsnit 3.1. I Tabel 4 vises også andelen af tiden i perioden hvor ventilatoren har kørt på det lave trin.

Figur 33 til Figur 36 viser timeværdier for ventilatorhastighed og forskel i absolut fugtighed og forskel i CO₂-koncentration mellem udsugningsluften og udeluften for de fire måleserier i Tabel 4. Ventilatorhastigheden er normeret i forhold til det høje trin.

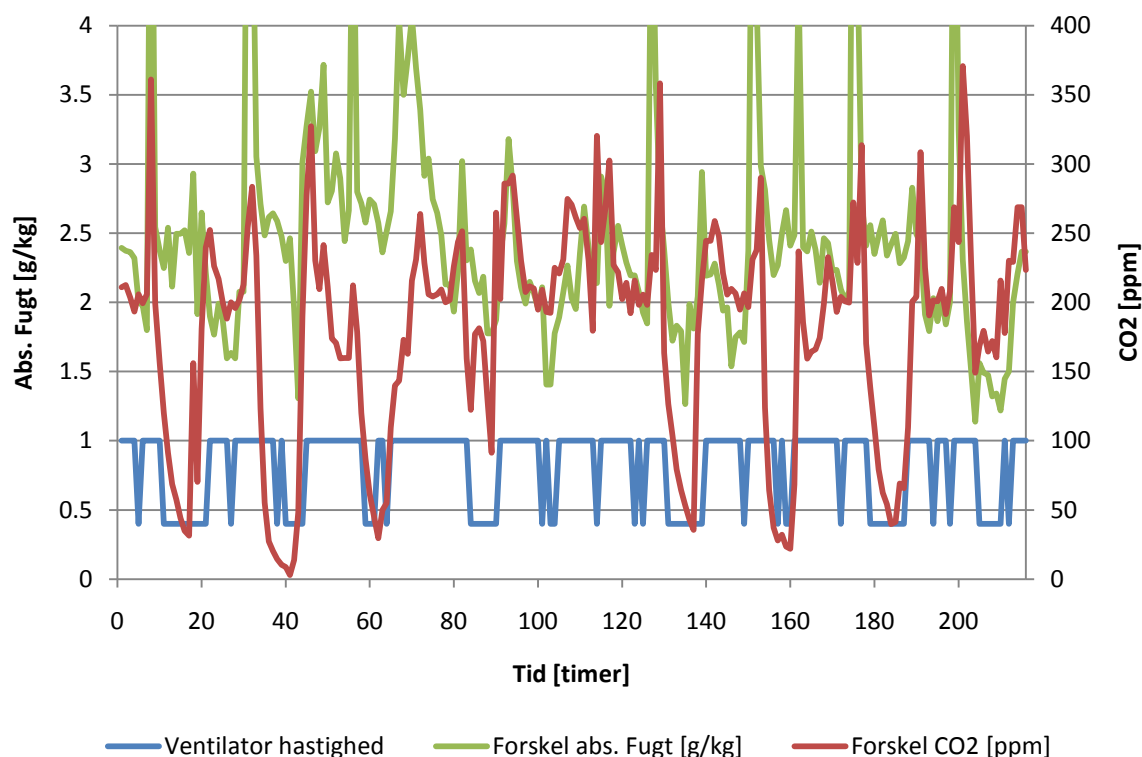
Det ses af resultaterne for måleserie Simpel 1, at en grænseværdi for absolut fugtighed på 1 g/kg medfører at ventilationsanlægget meget sjældent skifter til det lave trin. Derfor er alle andre måleserier udført med grænseværdi for absolut fugtighed på 2 g/kg. Det ses, af måleserier Simpel 1, Simpel 2 og Simpel 3 at ventilatoren i disse tilfælde kører ca. 35 % af tiden på det lave trin. Af figurerne ses, at ventilatoren i måleserierne Simpel 2 og Simpel 3 ret ofte skifter mellem høj og lav hastighed. I måleserie Simpel 4 kører ventilatorer i mere sammenhængende perioder enten på det lave eller høje trin, hvilket er mere hensigtsmæssigt. I de følgende analyser går derfor videre med resultater fra måleserie Simpel 4.

Tabel 4. Måleserier udført med simpel reguleringsstrategi. Af tabellen fremgår i hvilken periode målingerne er foretaget og de anvendte grænseværdier for forskel i CO₂-koncentration og forskel i absolut fugtighed, der afgør om systemet kører med højt eller lavt luftskifte.

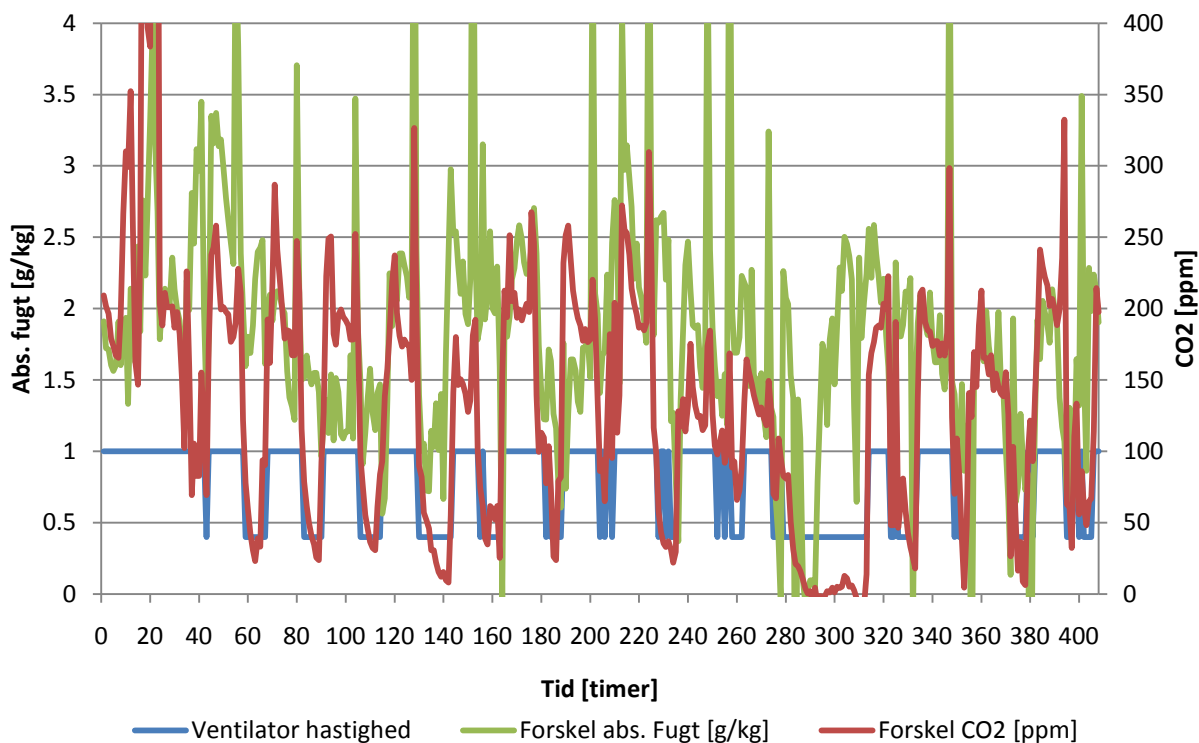
Måleserie	Måleperiode	Grænseværdi for forskel i CO ₂ -koncentration [ppm]	Grænseværdi for forskel i absolut fugtighed [g/kg]	Andel af tid på lavt trin
Simpel 1	20/2 til 26/2 2009	100	1	13 %
Simpel 2	18/3 til 26/3 2009	200	2	31 %
Simpel 3	28/3 til 13/4 2009	100	2	34 %
Simpel 4	15/4 til 24/4 2009	150	2	37 %



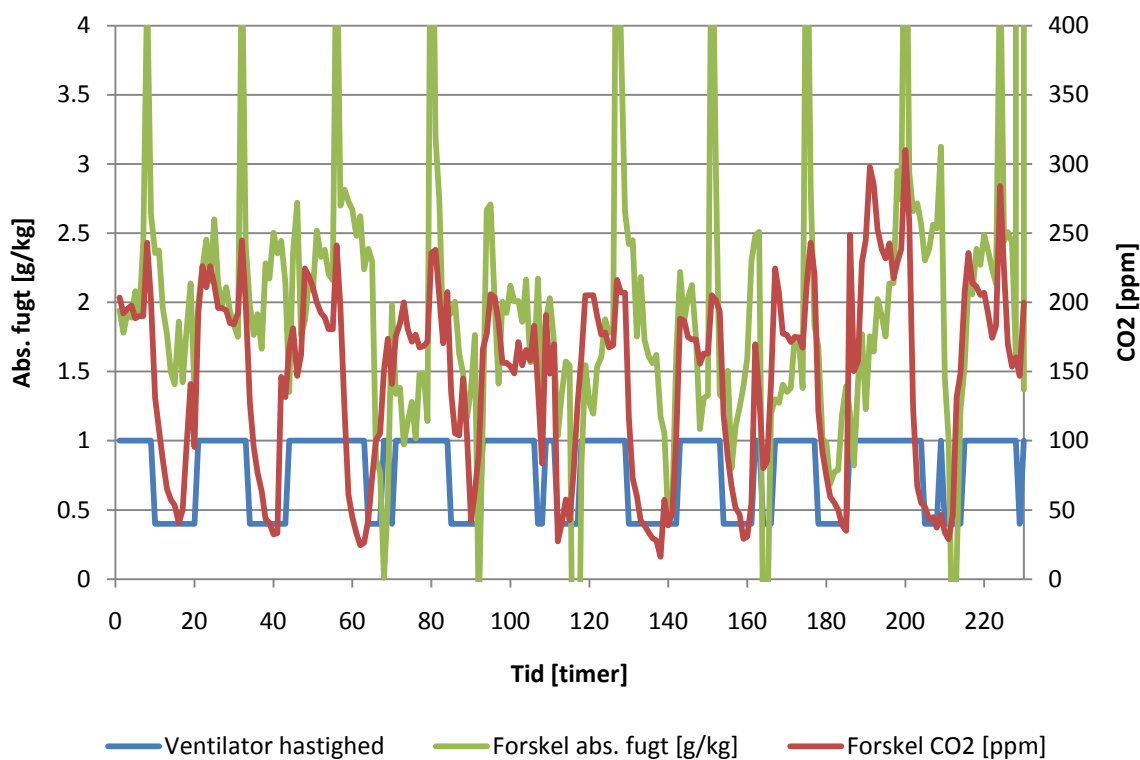
Figur 33. Forskel i absolut fugtighed og CO₂-koncentration mellem udsugningsluft og udeluft samt ventilatorhastighed for måleserie 1 med grænseværdier for forskel i CO₂-koncentration på 100 ppm og forskel i absolut fugtighed på 1 g/kg.



Figur 34. Forskel i absolut fugtighed og CO₂-koncentration mellem udsugningsluft og udeluft samt ventilatorhastighed for måleserie 2 med grænseværdier for forskel i CO₂-koncentration på 200 ppm og forskel i absolut fugtighed på 2 g/kg.



Figur 35. Forskel i absolut fugtighed og CO₂-koncentration mellem udsugningsluft og udeluft samt ventilatorhastighed for måleserie 3 med grænseværdier for forskel i CO₂-koncentration på 100 ppm og forskel i absolut fugtighed på 2 g/kg.



Figur 36. Forskel i absolut fugtighed og CO₂-koncentration mellem udsugningsluft og udeluft samt ventilatorhastighed for måleserie 4 med grænseværdier for forskel i CO₂-koncentration på 150 ppm og forskel i absolut fugtighed på 2 g/kg.

7.1 Indeklima

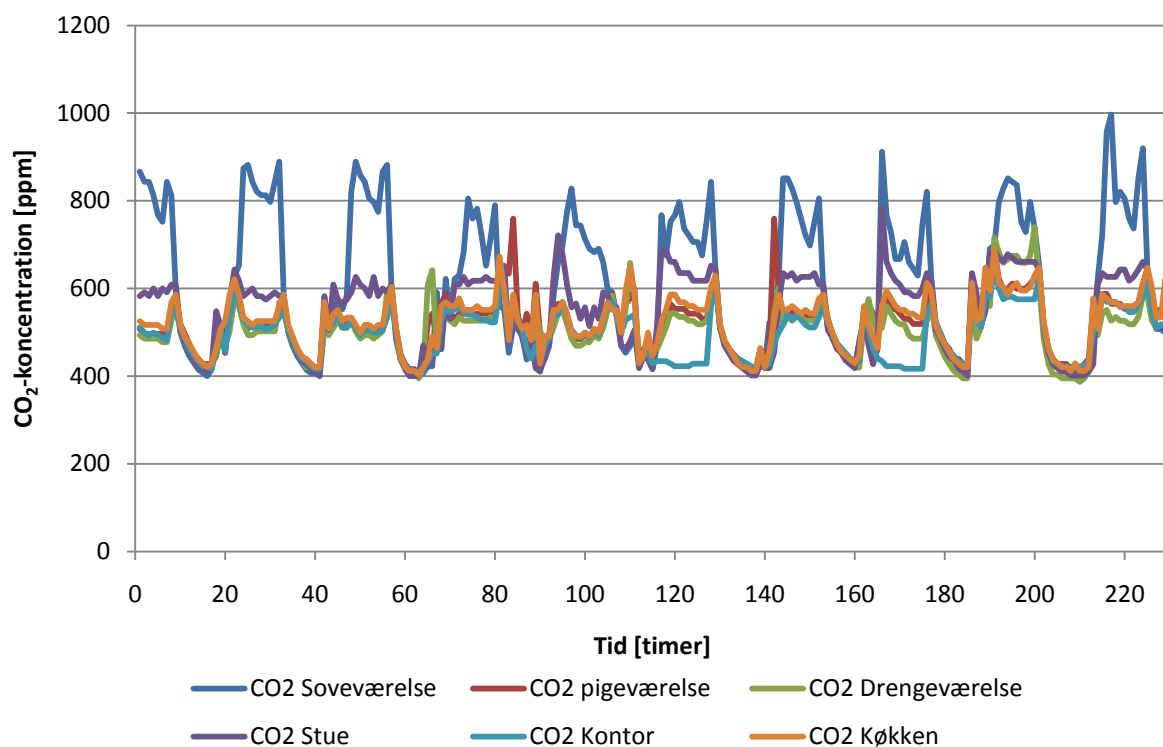
Det atmosfæriske indeklima vurderes for måleserie Simpel 4 hvor grænseværdierne for forskel i absolut fugtighed er 2 g/kg og for forskel i CO₂-koncentration er 150 ppm.

Figur 37 viser som forventet en øget CO₂-koncentration i boligen når der er personer tilstede. I dagtimerne hvor der er ikke er personer tilstede falder CO₂-koncentrationen i løbet af få timer til en koncentration nær udeluftens. Sammenlignes med Figur 29 ved almindelig drift ses samme tendens til variation over døgnet selvom luftstrømmen er væsentligt reduceret i det behovstyrede tilfælde. Det kan derfor konkluderes, at den simple behovstyring ikke giver anledning til højere CO₂-koncentrationer i boligen end situationen med konstant luftstrøm i ventilationsanlægget. Det ses igen tydeligt, at soveværelset er det mest belastede rum.

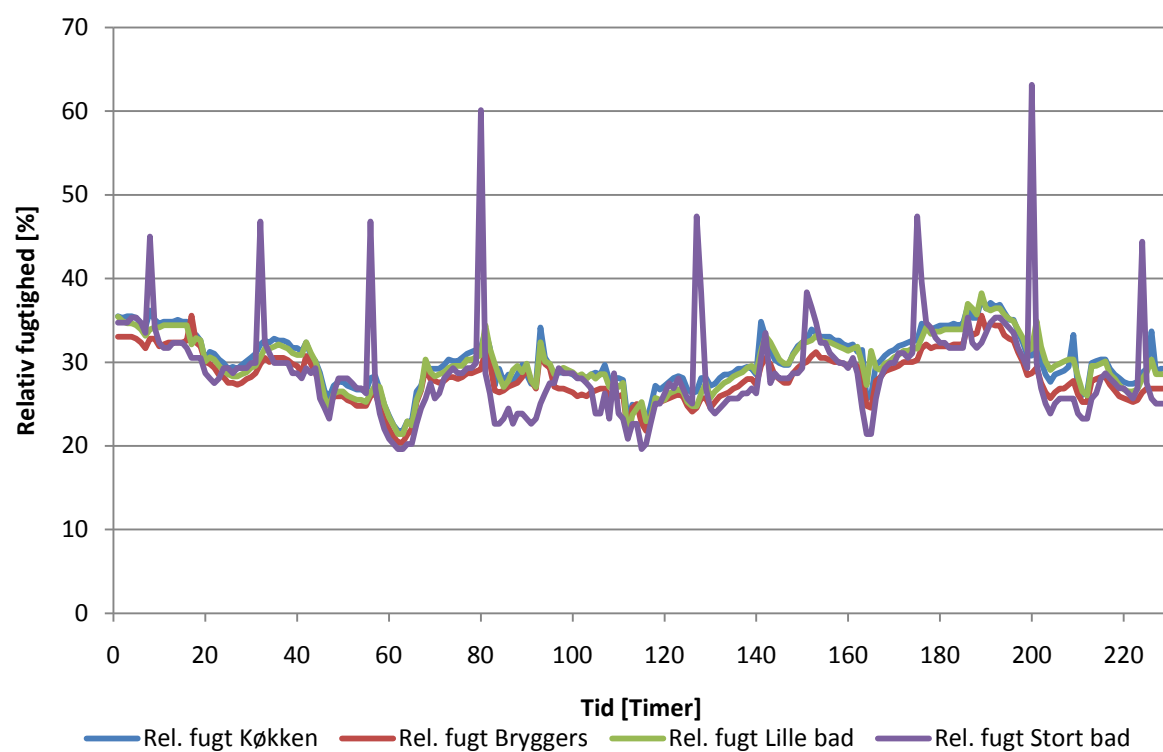
Figur 38 viser den relative fugtighed i boligens fugtbelastede rum. Sammenlignes med Figur 31 ved almindelig drift ses samme tendens til variation over døgnet selvom luftstrømmen er væsentligt reduceret i det behovstyrede tilfælde. Det kan derfor konkluderes, at den simple behovstyring ikke giver anledning til højere relativ fugtighed i boligen end situationen med konstant luftstrøm i ventilationsanlægget.

På baggrund af de udført målinger kan konkluderes, at den simple regulering medfører et atmosfærisk indeklima, der er sammenligneligt med et anlæg med konstant luftstrøm når der sammenlignes på grundlag af CO₂-koncentration og fugtighed.

I boligen er også andre forureningskilder tilstede som ikke knytter sig til personbelastningen. F.eks. afgasning fra inventar og byggematerialer. Når der ikke er personer tilstede, og ventilationen kører på det lave trin, vil koncentrationen af disse kilder være højere i situationen med behovstyring. Den lave ventilationsrate er valgt på baggrund af DS/EN 15251 (DS, 2007) netop for at opretholde en tilfredsstillende ventilation når der ikke er personer tilstede. Det vurderes derfor, at koncentrationen af andre kilder ikke medfører forringelse af indeklimaet. Center for Indeklima og Energi ved DTU har igangværende undersøgelser af hvordan boligens indeklima påvirker børns helbred og resultater fra disse studier vil kunne danne baggrund for nærmere vurdering af om der er en risiko forbundet med reduceret ventilation udenfor brugstiden. De fleste boliger i undersøgelsen har dog ikke mekanisk ventilation.



Figur 37. CO₂-koncentration i opholdsrum for måleserie Sempel 4.



Figur 38. Relativ fugtighed i fugtbelastede rum for måleserie Sempel 4.

7.2 Diskussion af simpel reguleringsstrategi

Den simple reguleringsstrategi er baseret udelukkende på målinger i ventilationsaggregatet. Seks målinger er indført i aggregatet: CO₂-koncentration, lufttemperatur og relativ fugtighed ved udsugningsstuds og ved udeluftstuds. Denne reguleringsstrategi kan implementeres udelukkende via ventilationsaggregatet. Strategien kan således også implementeres i eksisterende bygninger uden at ændre på kanalsystemet og i nye bygninger kan reguleringsstrategien benyttes uden at skulle indbygge fordyrende komponenter i kanalsystemet.

Indeklimaet målt på CO₂-koncentration og fugtighed er ifølge måleresultaterne ikke forringet i forhold til boligen med konstant ventilationsrate.

Resultaterne viser at anlægget kører med det lave luftskifte ca. 35% af tiden hvor ventilatorerne kører med en hastighed svarende til 40 % af hastigheden ved det høje luftskifte. Anvendes de sædvanlige proportionalitetslove for effektforbruget svarer det teoretisk til at elforbruget ved det lave luftskifte kun er 6 % af elforbruget ved det høje luftskifte. Ud fra denne betragtning er elforbruget reduceret med 32 % sammenlignet med et anlæg der konstant kører med det høje luftskifte. I virkeligheden er reduktionen i elforbruget nok noget lavere, da ventilatorvirkningsgrad og motorvirkningsgrad må forventes reduceret ved den lave ventilatorhastighed. Desværre er effektforbruget ikke blevet målt i projektet.

Resultaterne fra forsøgene viser, at det næsten altid er CO₂-koncentrationen, der er udløsende for at anlægget kører med det største luftskifte. Det kunne derfor overvejes kun at måle CO₂-koncentration i aggregatet, hvilket dog kan give risiko for at luftfugtigheden bliver for høj, hvis der er en væsentlig fugtproduktion når der ikke er personer i boligen.

8 Forhold i forsøgshuset med avanceret reguleringsstrategi

Den avancerede regulering giver mulighed for individuel regulering af luftstrømmen til opholdsrummene ved hjælp af spjæld indbygget i indblæsningssystemets tilslutningskanaler. Ventilationen er indreguleret således, at en situation med alle spjæld i den mest åbne position medfører en ventilation på ca. 0,35 l/(s m²) og en situation med alle spjæld i den mest lukkede position medfører en ventilation på ca. 0,1 l/(s m²). De øvre og nedre grænser for ventilationen er således identiske med grænserne for den simple reguleringsstrategi. Den avancerede reguleringsstrategi giver således som udgangspunkt ikke mulighed for en forcering af luftmængden over kravet i Bygningsreglementet (EBST, 2008)

Tabel 5 viser i mere detalje indreguleringen af højeste og laveste luftmængder for de enkelte rum og reguleringsområdet for spjæld i indblæsningssystemet.

Tre måleserier er udført med forskellig setpunkt for CO₂-koncentrationen i opholdsrummene. I alle måleserie er fugtstyringen sat til at åbne alle spjæld til den mest åbne position hvis den relative fugtighed overstiger 80% i et af de fugtbelastede rum. Tabel 6 viser måleperiode og setpunkter for de tre måleserier.

Måling af volumenstrømme er søgt indført via måling af trykforskelle over varmeveksleren i indblæsnings- og udsugningssystemet. For indblæsningen er målt en volumenstrøm på 82 m³/h ved en trykforskel over veksleren på 7,6 Pa og en volumenstrøm på 250 m³/h ved en trykforskel over veksleren på 16,3 Pa. For udsugningen er målt en volumenstrøm på 65 m³/h ved en trykforskel over veksleren på 3,4 Pa og en volumenstrøm på 239 m³/h ved en trykforskel over veksleren på 7,2 Pa. Desværre er logning af data for trykforskelle over veksleren ikke blevet registreret korrekt. Det er således ikke muligt at give præcise resultater for volumenstrømmen i systemet.

Tabel 5. Indregulerede maksimale og minimale luftmængder i indblæsning og udsugning ved den avancerede styring med tilhørende ventilatorhastighed. Området for spjældregulering er angivet for indblæsning til de enkelte opholdsrum. Der er ikke spjældregulering på udsugningen. Indblæsningsventilatoren reguleres efter et konstant kanaltryk på 44 Pa. Udsugningsventilatoren reguleres som slave af indblæsningen så volumenstrømme i indblæsning og udsugning er balancerede.

Luftmængde	Udsugning max [m ³ /h]	Udsugning min [m ³ /h]	Indblæsning max [m ³ /h]	Indblæsning min [m ³ /h]	Spjældindstilling	
					Min [%]	Max [%]
Drengeværelse			49	15	35	85
Pigeværelse			36	13	40	85
Soveværelse			61	22	35	85
Opholdsstue			52	19	35	85
Kontor			34	12	35	85
Køkken/Alrum	71	25				
Bryggers	39	14				
Stort Bad/WC	57	20				
Lille Bad/WC	52	18				
I alt [m ³ /h]	217	77	232	80		
Ventilator hast.	80 %	32 %	75 %	24 %		

Tabel 6. Måleserier udført med avanceret reguleringsstrategi. Af tabellen fremgår i hvilken periode målingerne er foretaget og de anvendte grænseværdier CO₂-koncentration i opholdsrum og relativ fugtighed i badeværelser og bryggers.

Måleserie	Måleperiode	Setpunkt for CO ₂ -koncentration [ppm]	Grænseværdi for relativ fugtighed [%]
Avanceret 1 *	18/8 til 4/9 2009	500	80
Avanceret 2 *	10/9 til 28/9 2009	800	80
Avanceret 3 **	20/10 til 4/11 2009	800	80

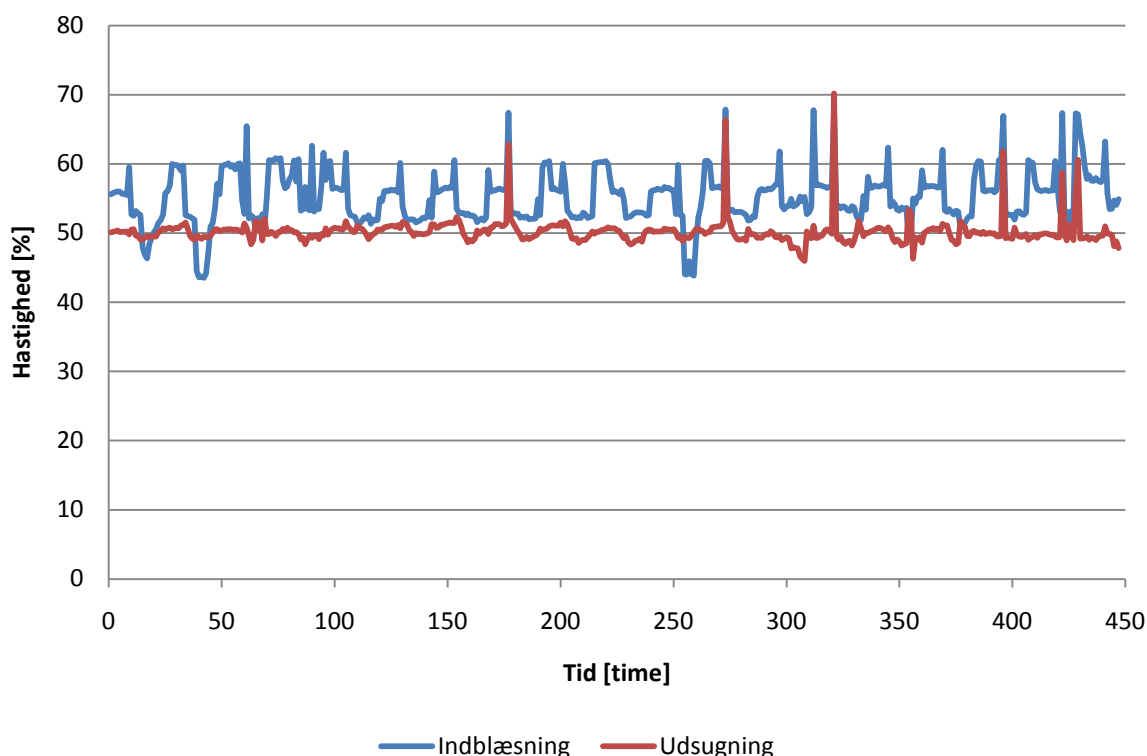
* Udsugningsventilatoren kørt med konstant hastighed og luftsiftet er således ikke balanceret.

** Udsugningsventilatoren har kørt som slave af indblæsningen og der er mulighed for forcering af luftstrømmen i soveværelset.

8.1 Betydning af setpunkt for CO₂-koncentration

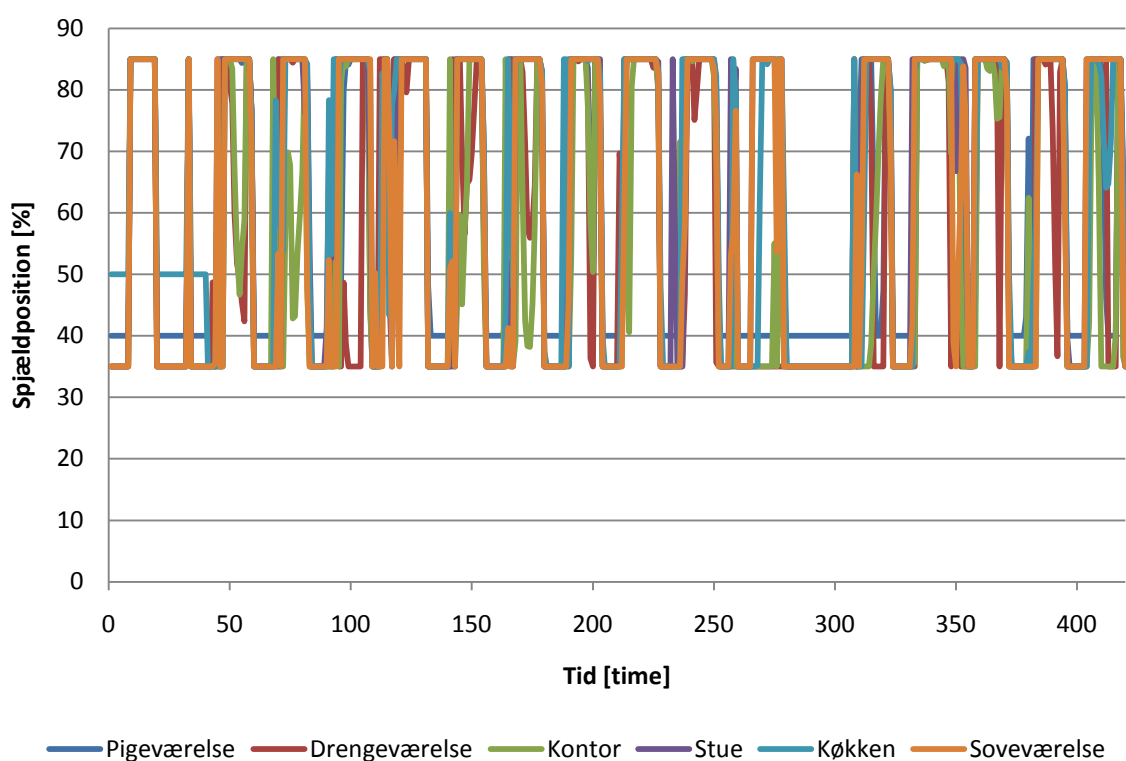
Efter dataopsamlingen for måleserierne Avanceret 1 og 2 viste det sig at reguleringen ikke har kørt som forudsat. Figur 39 viser ventilatorhastigheden for måleserien Avanceret 2. Det ses, at udsugningsventilatoren kører med næsten konstant hastighed, og luftstrømmen i udsugningen har således været mere eller mindre konstant, mens luftstrømmen i indblæsningen har varieret efter spjældpositioner. Ind imellem kører udsugningsventilatoren op i hastighed pga. høj relativ fugtighed i badeværelset hvilket medfører at fugtreguleringen går i gang.

Resultaterne fra disse målinger er således fejlbehæftede men kan alligevel vise betydningen af setpunktet for CO₂-koncentrationen i opholdsrummene. Resultater for måleserien Avanceret 3, hvor luftstrømmene er balancerede vises i næste afsnit.

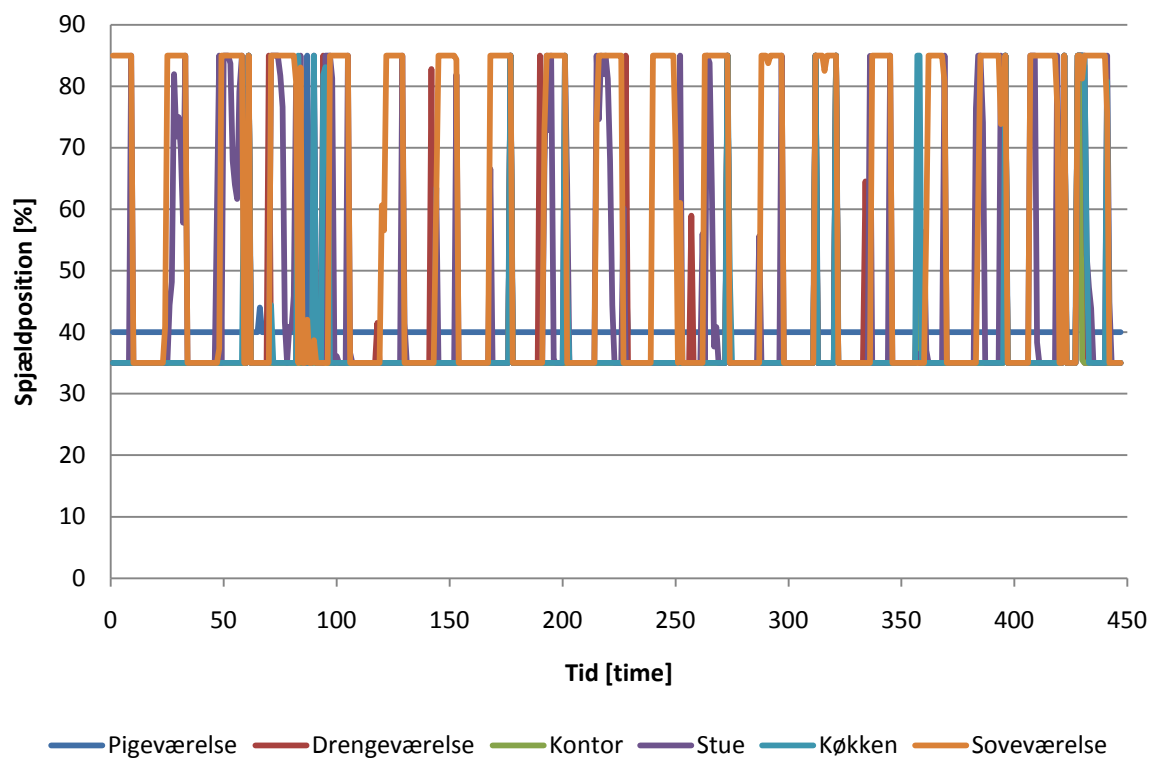


Figur 39. Ventilatorhastighed for indblæsning og udsugning i måleperioden Avanceret 2 med CO₂-setpunkt 800 ppm.

Figur 40 og figur 41 viser spjældpositioner for de to måleserier. Ved CO₂-setpunkt 500 ppm i figur 40 ses, at de fleste spjæld står i den mest åbne position når der er personer i boligen og i mindst åbne position når der ingen er hjemme, hvilket skyldes at CO₂-koncentrationen for det meste overstiger 500 ppm i alle rum når der er personer til stede i boligen, hvilket fremgår af Figur 42. I denne situation minder reguleringen om den simple regulering, hvor der skiftes mellem en høj og lav ventilationsrate efter om beboerne er hjemme eller ej. Sættes CO₂-setpunktet til 800 ppm ses af figur 41 at spjældene er meget mere lukkede. Med undtagelse af spjældet til soveværelset, er alle spjæld i den mest lukkede position det meste af døgnet. Dette gælder også for spjæld til børnenes soverum om natten. Der ses til tider en kortvarig åbning af spjæld til stuen og børneværelserne. Sammenlignes med CO₂-koncentrationen i rummene i figur 43 ses, at de fleste situationer med spjæld i fuld åben position skyldes at CO₂-koncentrationen i rummet overstiger 800 ppm. Men der ses også spjældåbninger f.eks. i drengeværelset når grænseværdien for CO₂ ikke overskrides. Disse spjældåbninger passer med at der haves høj luftfugtighed i et af de fugtbelastede rum som ses i figur 45. Det ser således ud til at reguleringen af spjældene på baggrund af CO₂-koncentrationen og fugtigheden fungerer som ønsket.



Figur 40. Spjældpositioner i måleperioden for Avanceret 1 med CO₂-setpunkt på 500 ppm.



Figur 41. Spjældpositioner i måleperioden Avanceret 2 med CO₂-setpunkt 800 ppm.

Figur 42 og Figur 43 viser CO₂-koncentrationen i opholdsrummene for de to måleserie med CO₂-setpunkt 500 ppm hhv. 800 ppm. I begge tilfælde ses, at CO₂-koncentrationen generelt holdes under 1000 ppm med undtagelse af soveværrelset.

Sammenlignes med CO₂-koncentrationen for den simple regulering (Figur 37) ses i tilfældet med CO₂-setpunkt 500 ppm (Figur 42) næsten samme niveau af CO₂koncentrationen i de enkelte rum. Dette stemmer godt overens med at den avancerede regulering med CO₂-setpunkt 500 ppm opførte sig næsten som den simple regulering. Med CO₂-setpunkt 800 ppm (Figur 43) ses generelt højere CO₂-koncentration i opholdsrummene med undtagelse af soveværrelset. Dette stemmer godt overens med at flere spjæld er i den mindst åbne position selv når der er personer tilstede i boligen. Alligevel kommer CO₂-koncentrationen sjældent over 800 ppm i opholdsrummene med undtagelse af soveværrelset.

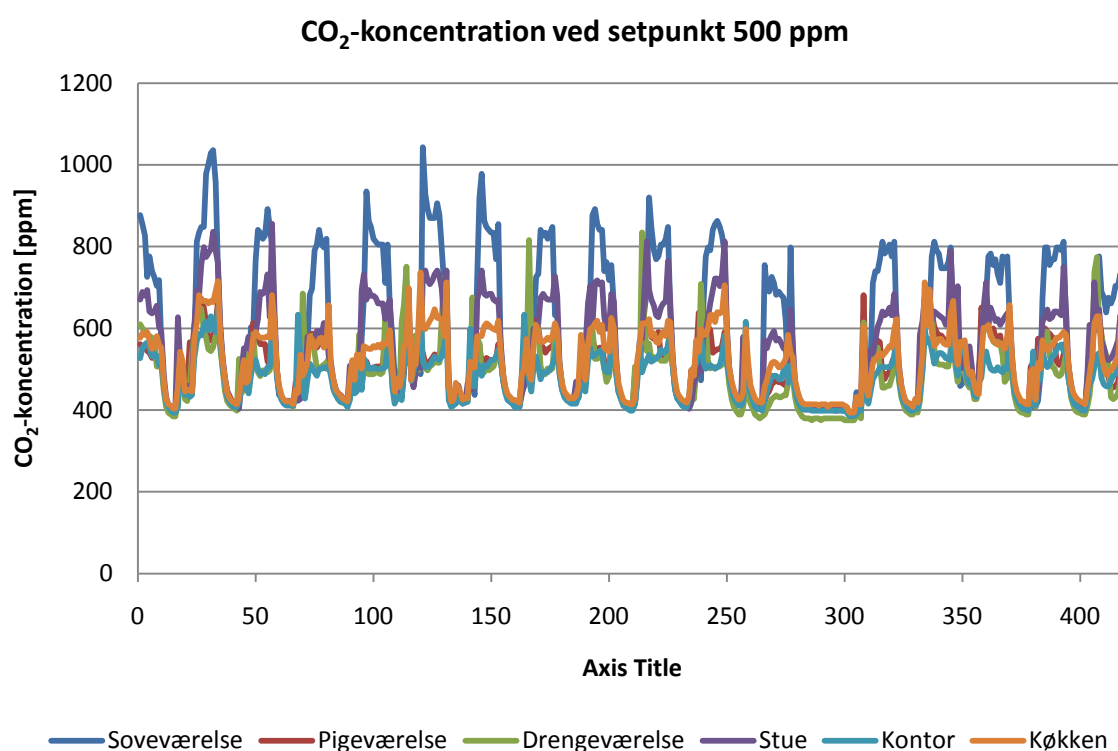
Når CO₂-setpunktet hæves fra 500 ppm til 800 ppm ventileres boligen mindre, og ved sammenligning med resultaterne for den simple strategi må konkluderes at boligen ventileres med mindre luftmængder end bygningsreglementets krav når der er personer tilstede i boligen.

Figur 44 og figur 45 viser den relative fugtighed i de fugtbelastede rum for de to måleserie med CO₂-setpunkt 500 ppm hhv. 800 ppm. Målingerne er foretaget først på efteråret, med højere udetemperaturer end ved målingerne for den simple regulering og målingerne med konstant ventilation. Derfor er den relative fugtighed generelt højere end for disse perioder. Den relative fugtighed holdes dog på et acceptabelt niveau. Igen ses kun stor belastning i det store badeværelse tilknyttet soveværrelset. Fugten produceret ved denne spidsbelastning ventileres dog hurtigt bort.

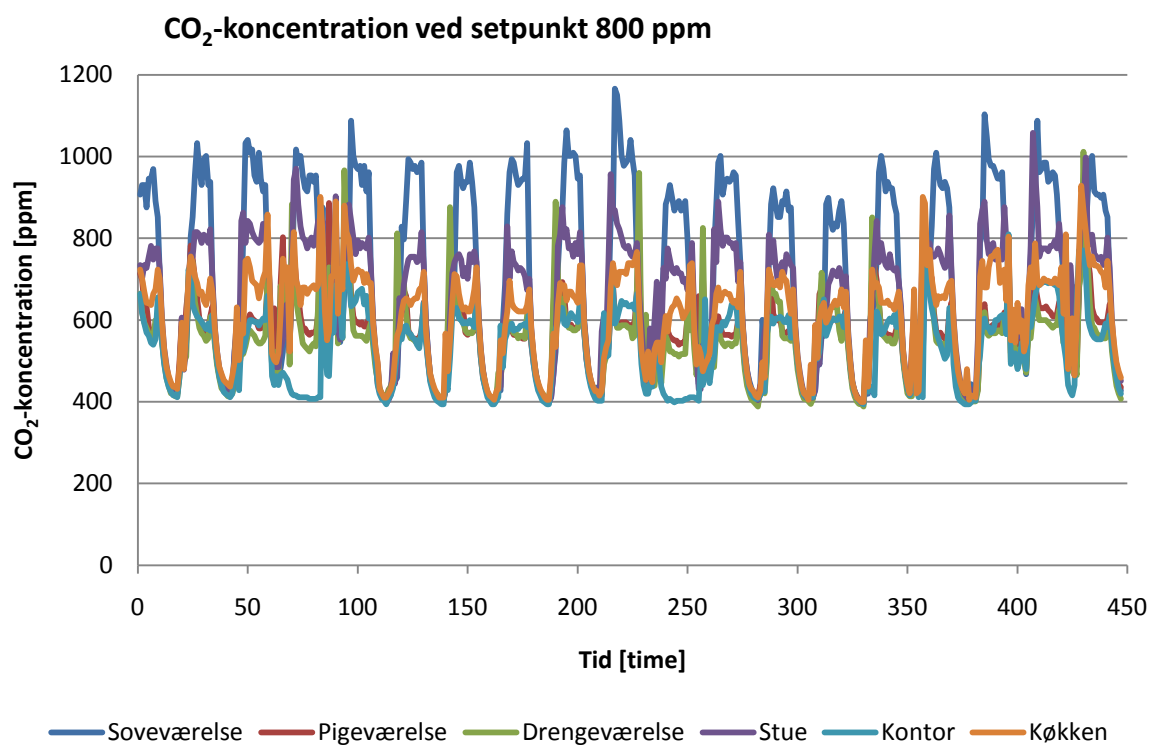
Det må således konkluderes at den avancerede strategi ikke giver anledning til større risiko mht. fugtigheden end en situation med konstant ventilation.

Det konkluderes, at den avancerede regulering med CO₂-setpunkt 500 ppm leverer et atmosfærisk indeklima vurderet på baggrund af CO₂-koncentration og fugtighed, som ikke adskiller sig væsentligt fra en situation med konstant ventilation. Øges CO₂-setpunktet til 800 ppm ses et svagt øget fugtindhold i indeluften sammenlignet med konstant ventilation. Dette vurderes ikke at være kritisk, da målinger af relativ fugtighed viser at fugten fjernes tilstrækkeligt effektivt og den øgede fugtmængde er meget moderat.

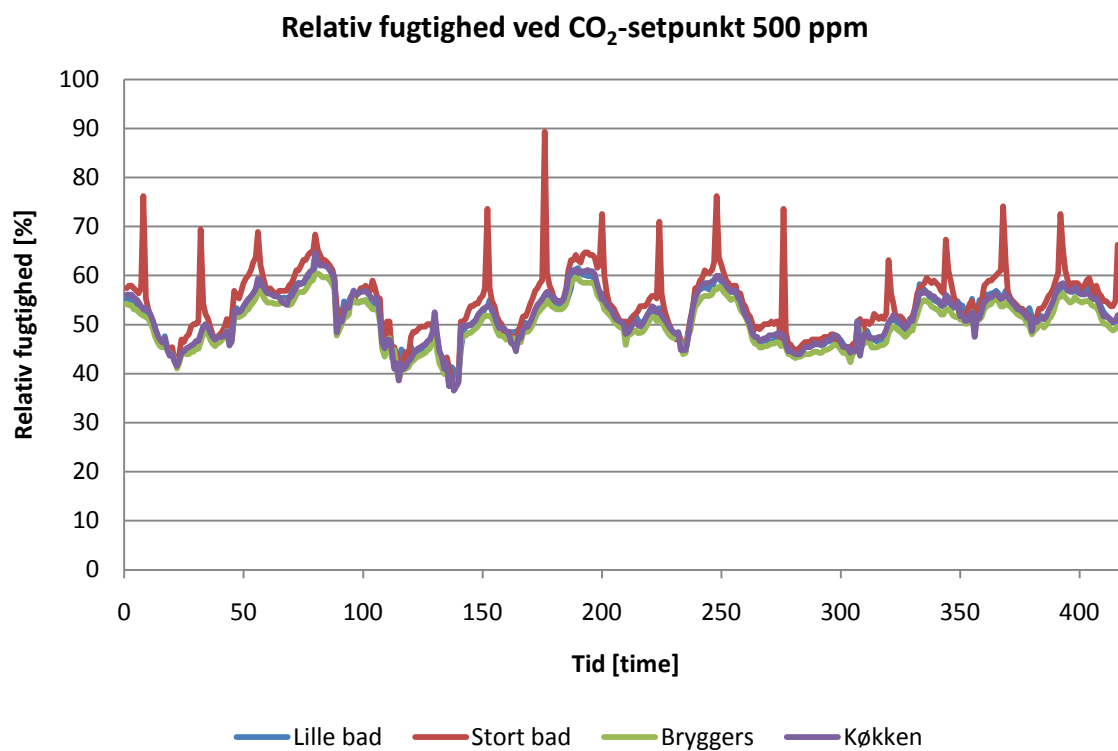
Sammenligninger er foretaget på forskellige tidspunkter. Brugsmønstre og udeklima varierer derfor i de enkelte perioder. De forskelle der observeres mellem de enkelte strategier er ikke større end at de kan skyldes ændringer i brugsmønstre.



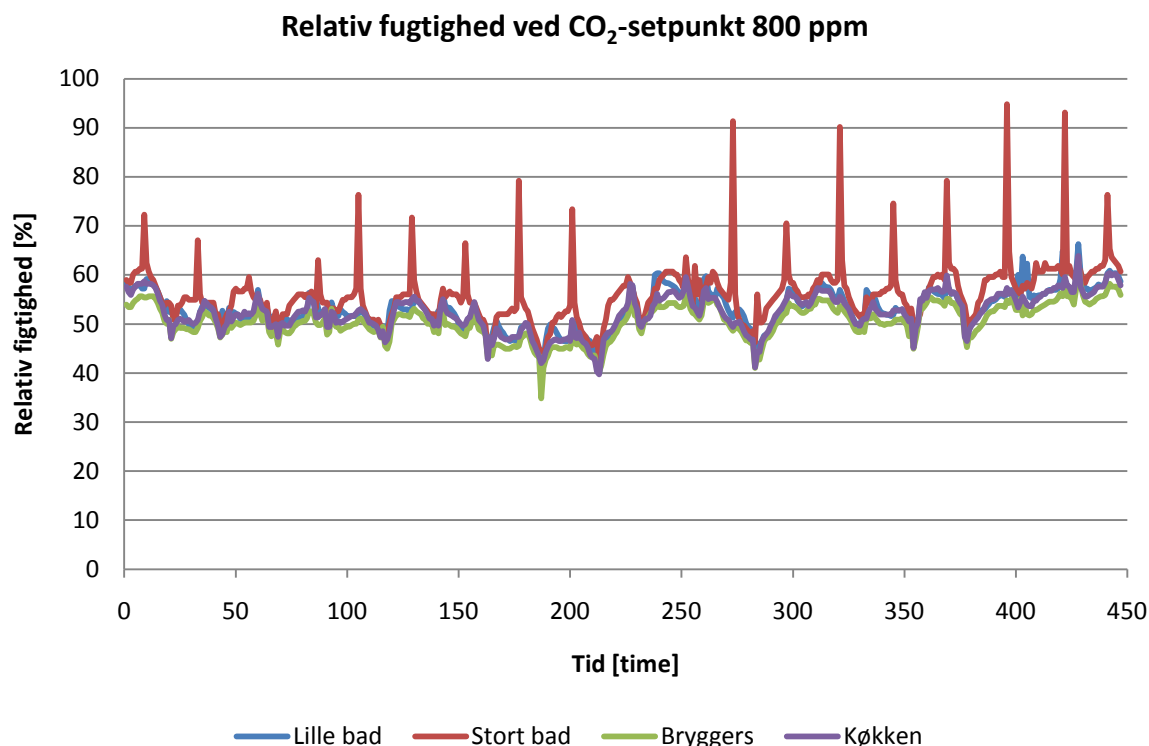
Figur 42. CO₂-koncentration i opholdsrum med regulering Avanceret 1



Figur 43. CO₂-koncentration i opholdsrum med regulering Avanceret 2



Figur 44. Relativ fugtighed i fugtbelastede rum med regulering Avanceret 1



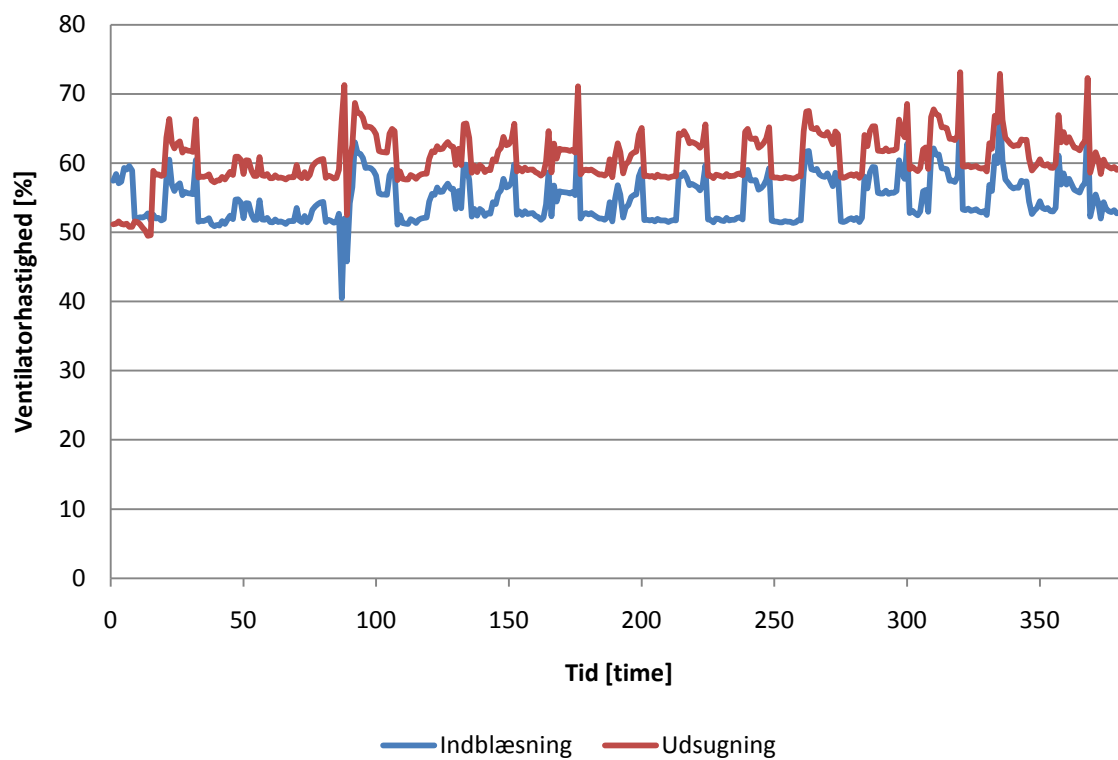
Figur 45. Relativ fugtighed i fugtbelastede rum med regulering Avanceret 2

8.2 Målinger med balancerede luftstrømme

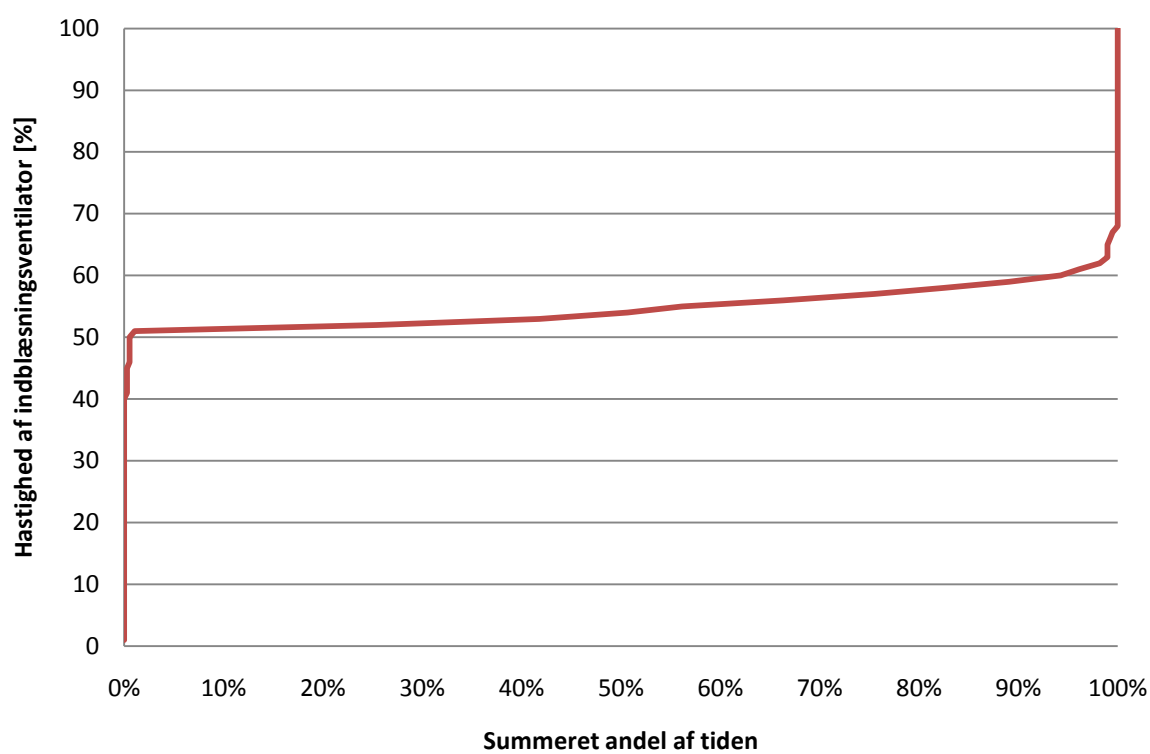
Reguleringen er for måleserien Avanceret 3 ændret således at udsugningsventilatoren kører som slave af indblæsningsventilatorer så de indblæste og udsugede luftstrømme er lige store. Figur 46 viser de målte hastigheder for indblæsnings- og udsugningsventilatoren. Hastigheden varierer nu på både indblæsning og udsugning som ønsket.

De tidligere resultater viste klart, at soveværelset er det mest belastede lokale, hvor CO_2 -koncentrationen ofte kommer over 1000 ppm. For at vurdere den avancerede regulerings mulighed for også at forcere luftstrømmen til et rum i boligen er reguleringen ændret således at spjældet til soveværelset kan åbnes helt.

Ventilatorhastigheden er et udtryk for luftstrømmen i anlægget, men giver ikke alene det fulde billede. Indblæsningsventilatorens hastighed reguleres så et konstant tryk på 44 Pa holdes i indblæsningskanalen. Når alle spjæld er i den mest åbne position skal ventilatoren have højere hastighed for at holde trykket end når alle spjæld står i mest lukket position. Figur 47 viser en varighedskurve for ventilatorhastigheden i indblæsningen for de to måleserier. Under driften ses, at ventilatoren hovedsageligt har kørt med hastighed mellem 50 % og 60 %. Det var forventet, at ventilatorhastigheden ville køre ned til 24 % når alle spjæld var i den mest lukkede position, men hastigheden er sjældent under 50 % i målingerne.

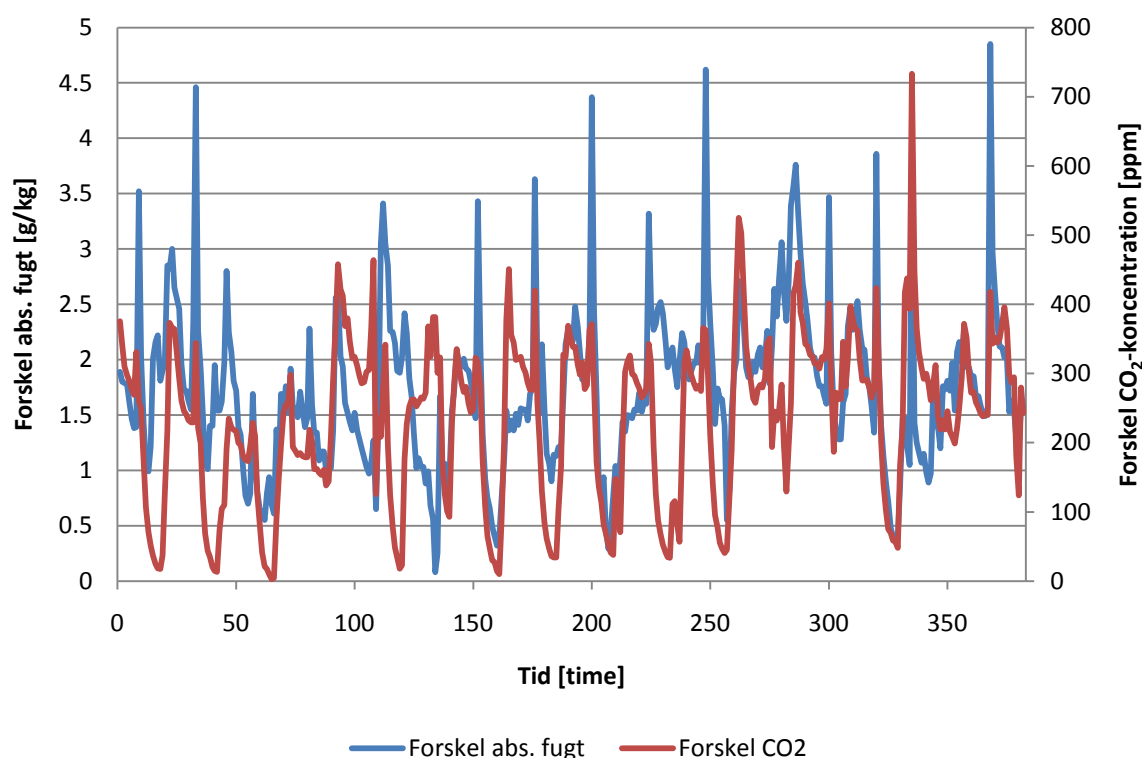


Figur 46. Ventilatorhastighed i udsugning og indblæsning for måleserie Avanceret 3.

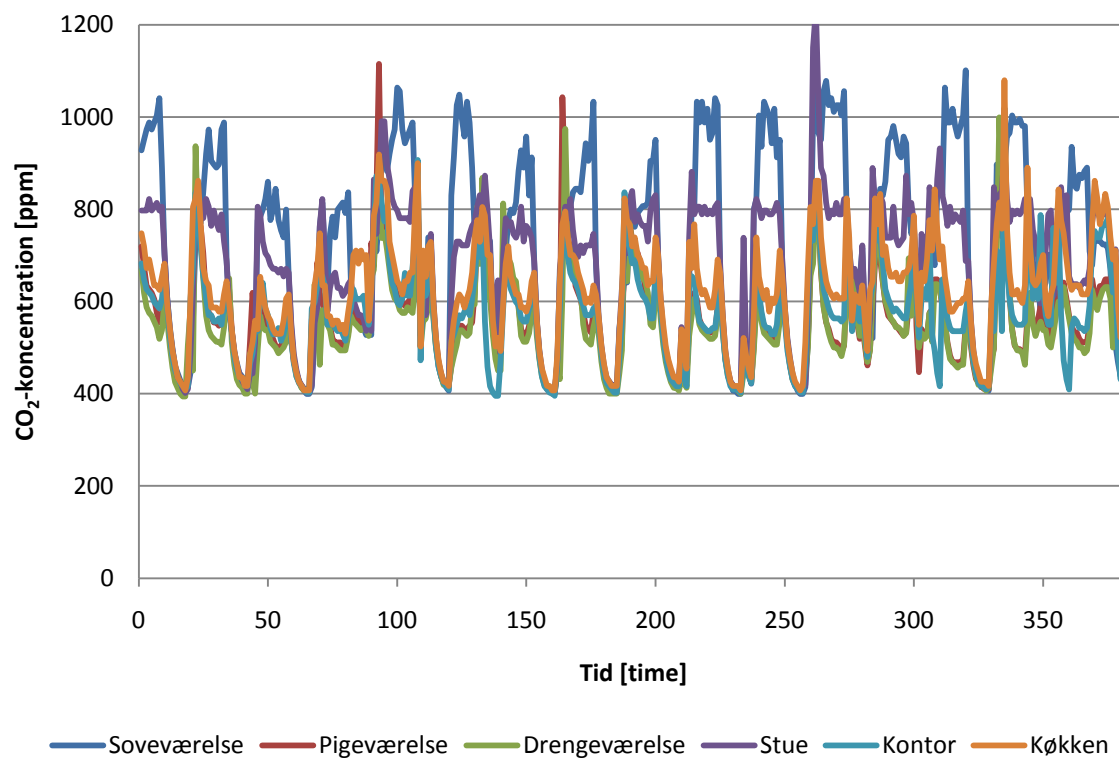


Figur 47. Varighedskurve der viser andel af tiden indblæsningsventilatoren kører under en given hastighed for måleserie Avanceret 3.

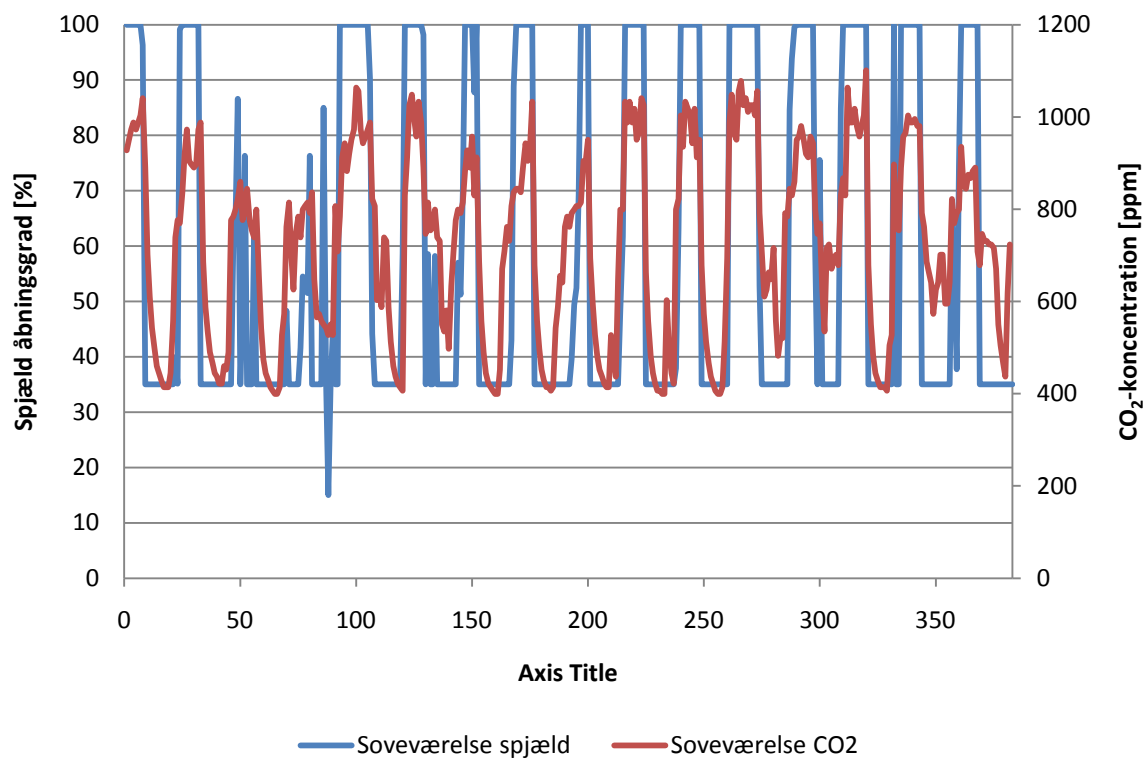
Figur 48 viser CO₂-koncentrationen i opholdsrummene for måleserie Avanceret 3. Det ses, at soveværelset er mest belastet og at CO₂-koncentrationen ofte overstiger setpunktet på 800 ppm. Med undtagelse af stuen er CO₂-koncentrationen i de andre opholdsrum sjældent over 800 ppm, hvilket medfører at spjældene til disse rum sjældent åbnes. Ventilationen i pige- og drengeværelset øges derfor sjældent. Figur 49 viser CO₂-koncentrationen og åbningsgrad af spjæld i soveværelset. Ud over en periode i starten af måleserien hvor beboerne oplyste, at kun en voksen var hjemme, ses spjældene åbner fuldt om natten og lukker i dagtimerne. Figur 50 viser CO₂-koncentrationen og åbningsgrad af spjæld i drengeværelset, som eksempel på reguleringen i de andre opholdsrum. Det ses, at CO₂-koncentrationen næsten aldrig kommer over 800 ppm, hvilket medfører, at spjældet det meste af tiden er i den mest lukkede position. Spjældet åbnes en gang imellem helt selvom CO₂-koncentrationen er under 800 ppm, hvilket skyldes at fugtstyringen aktiveres baseret på den relative fugtighed i et af baderummene. Figur 51 viser den relative fugtighed i de fugtbelastede rum. Den relative fugtighed holdes på et acceptabelt niveau. Igen ses kun stor belastning i det store badeværelse tilknyttet soveværelset. Fugten produceret ved denne spidsbelastning ventileres dog hurtigt bort.



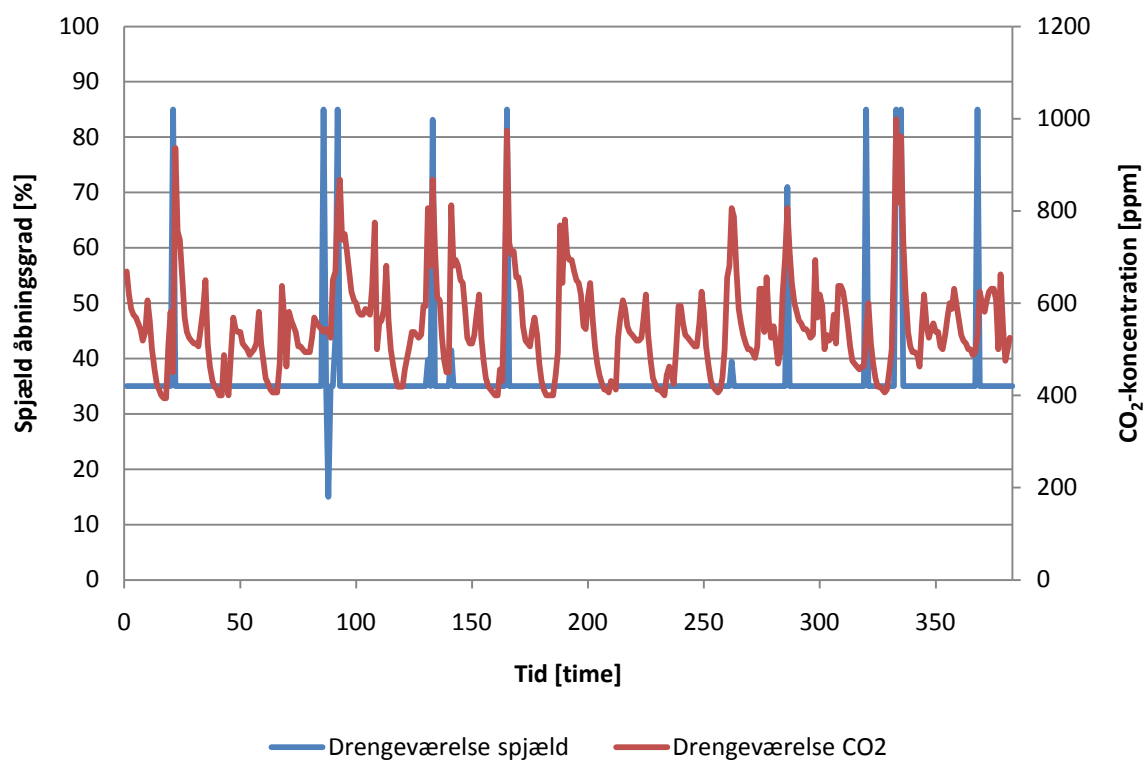
Figur 52 viser forskel i CO₂-koncentration og absolut fugtighed mellem inde- og udeluft. Sammenlignes med den simple reguleringsstrategi (Figur 36) ses lidt højere niveau for både CO₂ og absolut fugtighed i boligen, hvilket skyldes lavere luftskifte for boligen som helhed. Forskellen i absolut fugtighed holdes generelt under 2 g/kg en stor del af tiden, hvilket betyder at der ikke er øget risiko for fugtskader med den avancerede regulering.



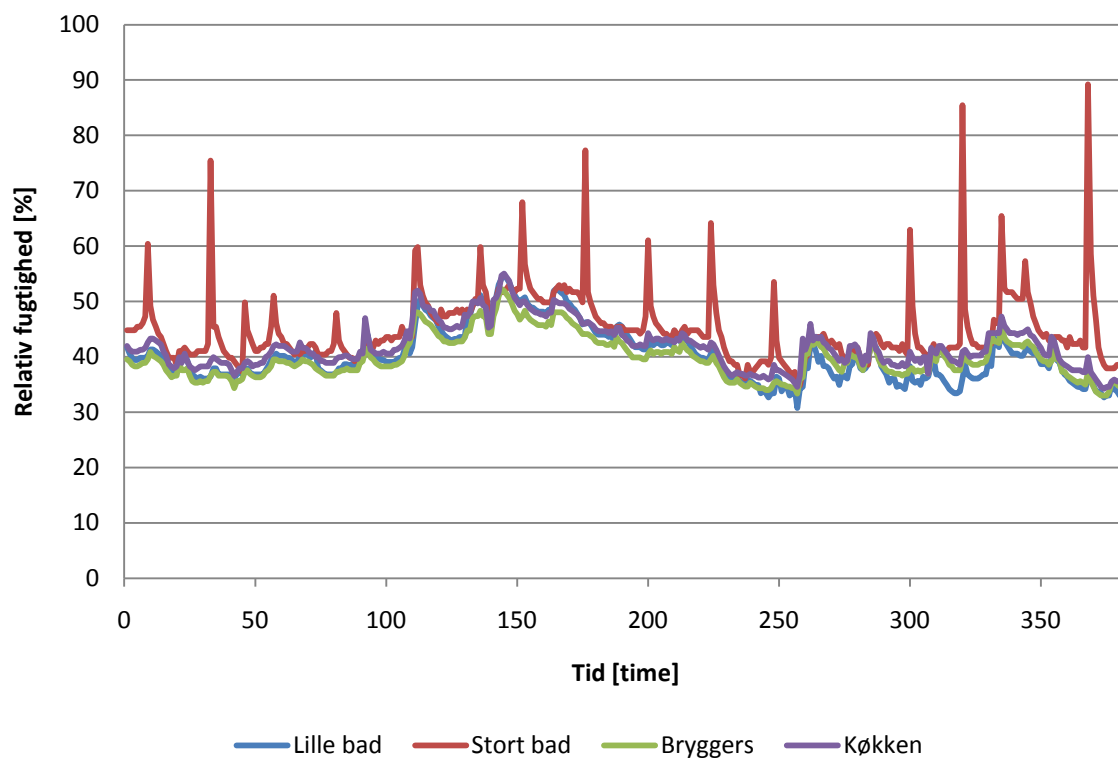
Figur 48. CO₂-koncentration i opholdsrum for måleserie Avanceret 3.



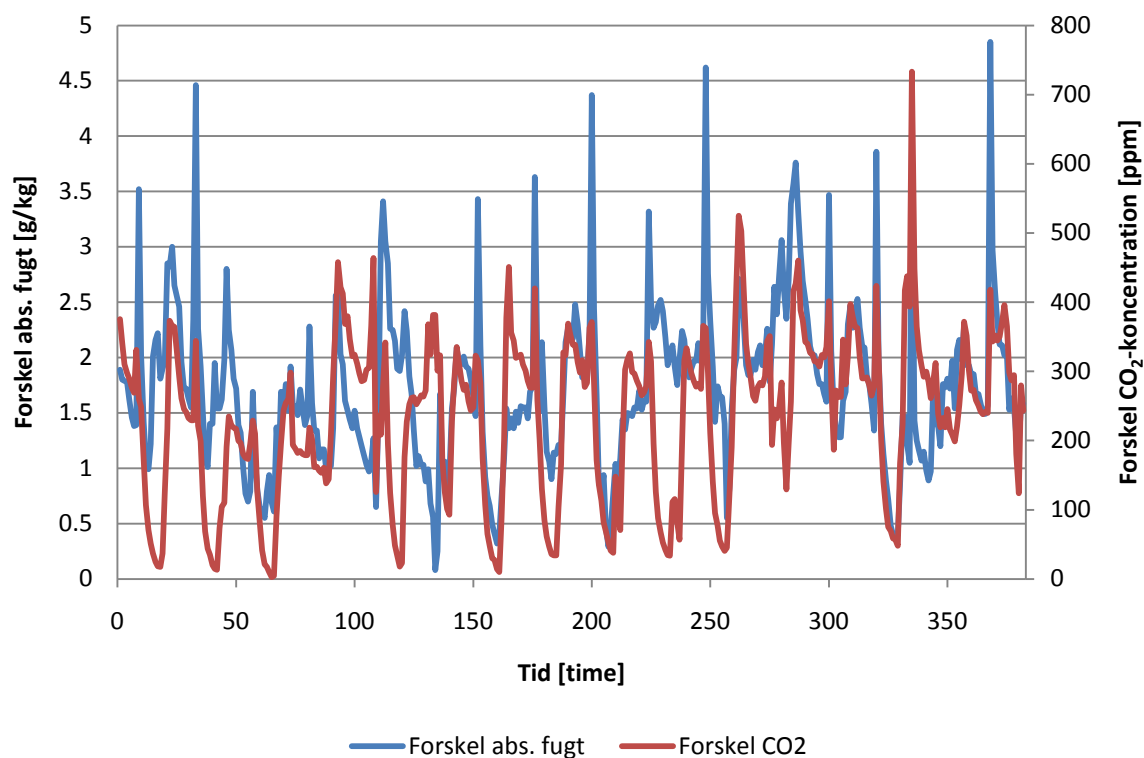
Figur 49. CO₂-koncentration og åbningsgrad af spjæld i soveværelset for måleserie Avanceret 3.



Figur 50. CO₂-koncentration og åbningsgrad af spjæld i drengeværelset for måleserie Avanceret 3.



Figur 51. Relativ fugtighed i fugtbelastede rum for måleserie Avanceret 3.



Figur 52. Forskel i absolut fugtighed og CO₂-koncentration mellem inde- og udeluft for måleserie Avanceret 3.

8.3 Diskussion af avanceret reguleringsstrategi

Den avancerede strategi er baseret på flere målinger foretaget i kanalsystemet og boligens rum. CO₂-koncentrationen måles i alle opholdsrum med indblæsning (5 rum i forsøgshuset), relativ fugtighed måles i alle fugtbelastede rum med udsugning (4 rum i forsøgshuset) og kanaltryk måles i indblæsningskanal. Der er indbygget spjæld med motorregulering i tilslutningskanaler til alle opholdsrum (5 spjæld). Derudover skal suppleres med måling af hovedvolumenstrømme som kræver måling af yderligere to trykforskelle. Desuden kræves udstyr til at håndtere dataopsamling og software til regulering. Den avancerede strategi berører således alle dele i anlægget og egner sig kun til implementering i nye anlæg. I den avancerede regulering indgår dele som er væsentligt fordyrende sammenlignet med dagens almindelige ventilationsanlæg til enfamiliehuse og er også væsentligt dyrere end den simple reguleringsstrategi.

Med henblik på at opnå lavest muligt elforbrug, er den implementerede konstanttrykreguleringen ikke optimal. Når der ikke er nogen belastning i boligen står alle spjæld i mest lukkede position og resulterer således i at tryktabet i kanalsystemet er højere end nødvendigt. Der er stadig en besparelse, da ventilatoren kører ned i hastighed. Det laveste tryktab og elforbrug ville opnås hvis der altid er mindst et spjæld, der står helt åbent. Det vil typisk være spjældet til det mest belastede rum i boligen på det givne tidspunkt. Samtidig skal ventilatoren køre så langt ned i hastighed, at det ønskede setpunkt netop opnås i det mest belastede rum. En metode til at opnå dette beskrives af Taylor (2007), hvor setpunktet for konstanttrykreguleringen hele tiden reguleres for at sikre mindst et helt åbent spjæld. I projektet var der ikke tid til at afprøve denne strategi. Efter projektets afslutning vil systemet fortsat være installeret i enfamiliehuset anvendt til forsøgene, og det vil forsøges at skaffe midler til at afprøve denne strategi. En pseudokode for denne reguleringsstrategi er vist i bilag 2. Koden er ikke afprøvet og er kun gengivet som en ide til en strategi som udnytter en trim and respond strategi (Taylor, 2007).

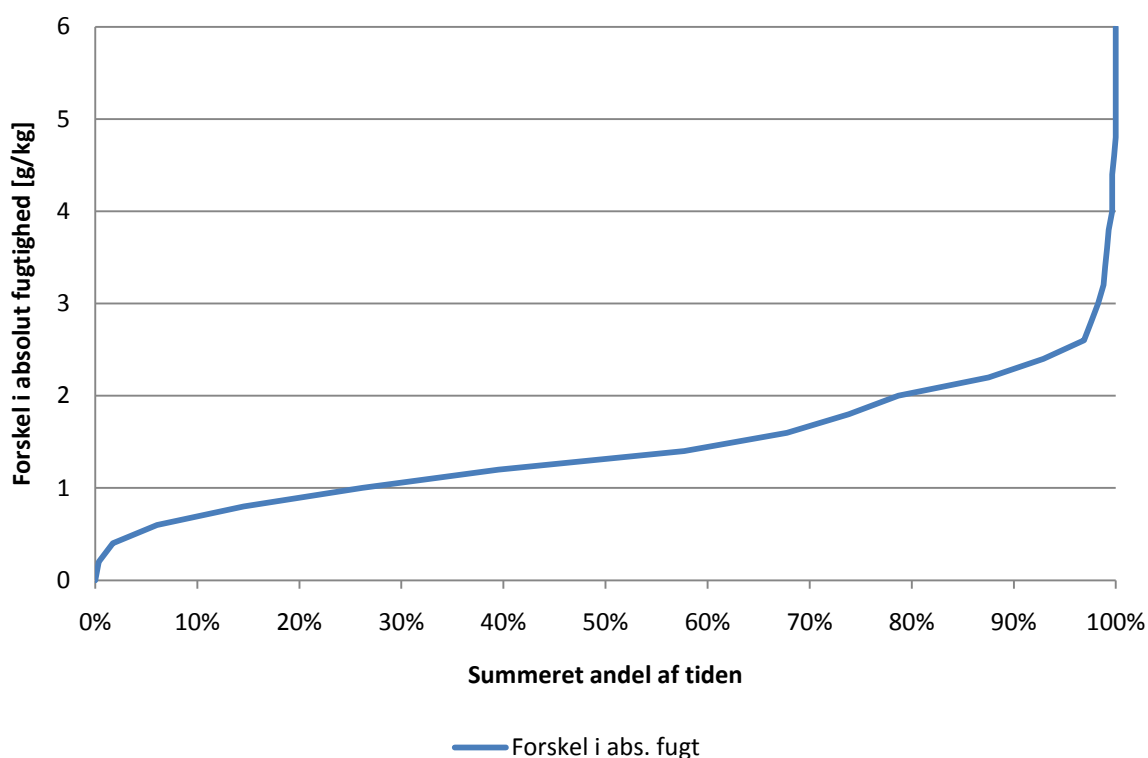
Resultaterne viser, at luftstrømmene til enkelte rum kan reduceres væsentligt på baggrund af regulering ud fra CO₂-koncentration og fugtighed. Det ses, at spjæld til andre rum end soveværelset meget sjældent er i den mest åbne position. Det medvirker en lavere ventilation af f.eks. børnenes soverum om natten, hvilket vil betyde en øget koncentration af andre forureningskilder i rummene. Rummene er dog altid mindst ventileret svarende den forurening som knytter sig til bygningen og inventar i kontorbygninger som anbefalet i DS/EN 15251 (DS, 2007).

9 Diskussion og sammenligning af reguleringsstrategier

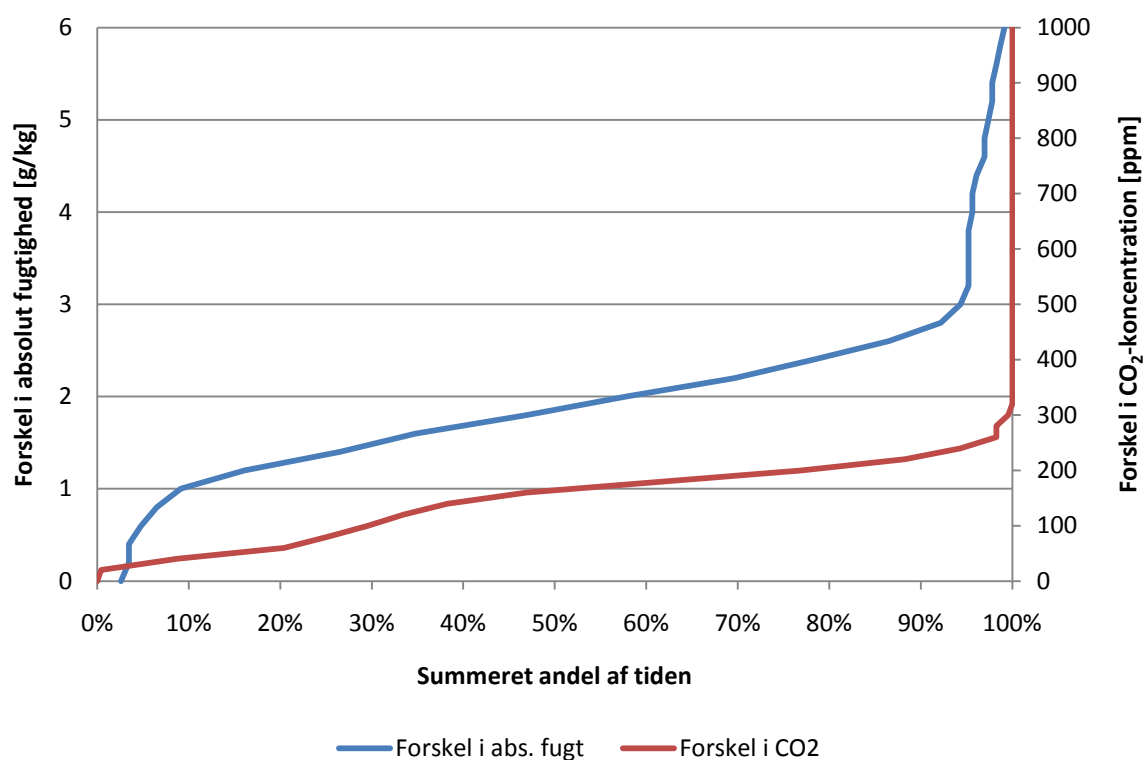
For at sammenligne den oprindelige konstante ventilation med den simple og avancerede regulering viser Figur 53 til Figur 55 histogrammer med den summerede andel af tiden for forskelle i CO₂-koncentration og absolut fugtighed mellem udsugnings- og indblæsningsluft. Data for CO₂-koncentration mangler for den oprindelige konstante ventilation.

Mht. forskel i absolut fugtighed ses, at fugtigheden af indeluften øges for begge de behovstyrede systemer i forhold til den konstante ventilation. I alle tilfælde er forskellen under 2 g/kg mere end halvdelen af tiden og overstiger kun 3 g/kg i mindre end 10 % af tiden. Det vurderes derfor, at den øgede fugtmængde i indeluften er moderat og ikke giver anledning øget risiko forbundet med fugtskader.

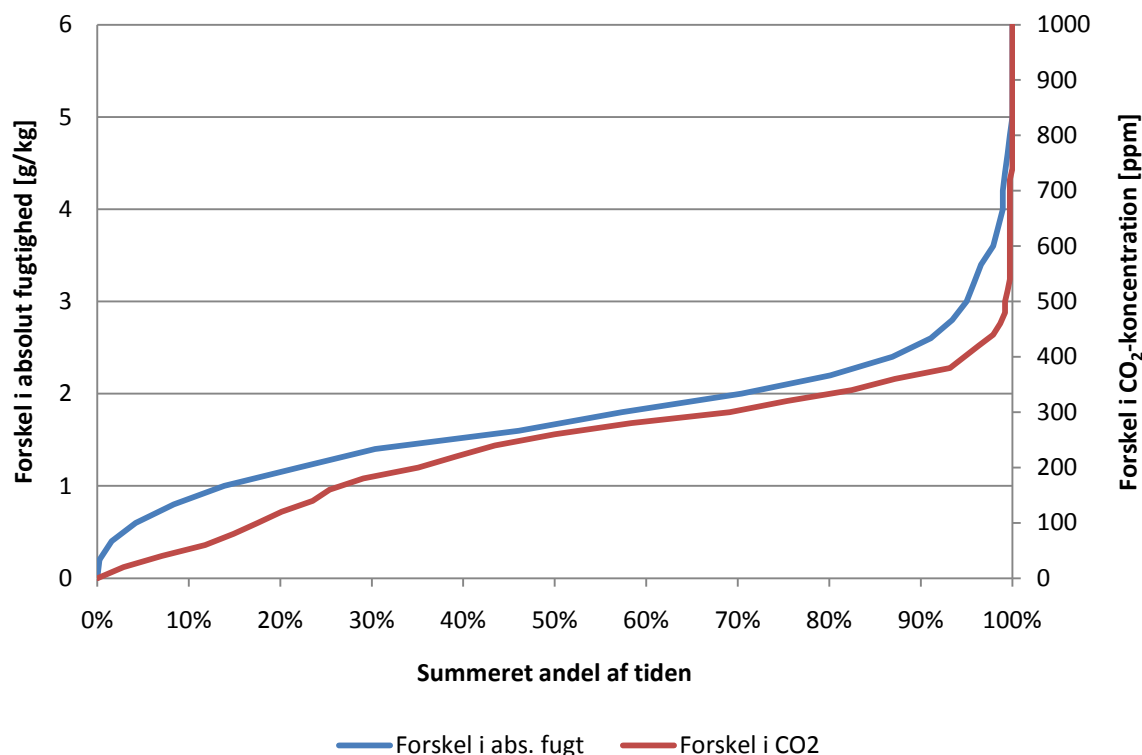
For de to behovstyrede systemer ses generelt lavere forskel i CO₂-koncentration for den simple regulering, hvilket stemmer godt overens med at den avancerede regulering i lange perioder har spjæld i den mest lukkede position og at boligen derfor som helhed ventileres mindre når der personer tilstede.



Figur 53. Varighedskurve for forskel i absolut fugtighed mellem udsugningsluft og indblæsningsluft for den oprindelige konstante ventilation målt i perioden 12. til 16. februar 2008.



Figur 54. Varighedskurver for forskel i absolut fugtighed og forskel i CO₂-koncentration mellem udsugningsluft og indblæsningsluft for den simple regulering. Data er vist for måleserie Simpel 4 med setpunkter for forskel i absolut fugtighed 2 g/kg og forskel i CO₂-koncentration 150 ppm.



Figur 55. Varighedskurver for forskel i absolut fugtighed og forskel i CO₂-koncentration mellem udsugningsluft og indblæsningsluft for den avancerede regulering. Data er vist for måleserie Avanceret 3 med setpunkt for CO₂-koncentration i opholdsrum 800 ppm og fugtregulering aktiveres ved 80 % relativ fugtighed i et af de fugtbelastede rum.

Den avancerede regulering giver mulighed for større energibesparelser end den simple regulering, da det samlede luftskifte i boligen reduceres. Den valgte reguleringsstrategi sikrer dog ikke at dette besparelspotentiale opnås mht. elforbruget, da den implementerede regulering holder et for højt tryk i kanalsystemet. Det er nødvendigt at udvikle reguleringsalgoritmen videre for at opnå det fulde besparelspotentiale.

Selvom de to forskellige strategier er implementeret og afprøvet i boligen over længere tid, kan kun den simple regulering anbefales på nuværende tidspunkt. Den simple regulering sikrer at luftkvaliteten i boligen er stort set den samme som ved en konstant ventilation. Desuden kræver den simple regulering "kun" to CO₂ sensorer, to relativ fugtighed sensorer og to temperatur sensorer, som dog alle skal checkes fx i forbindelse med filterskift. Styringen i lidt modificeret form anvendes i dag i møderum, kontorlokaler, institutioner etc.

Den avancerede styring rummer en del fordele sammenlignet med den simple regulering blandt andet muligheden for bedre fordeling af luften hvor der er brug for den. For at opnå et besparelspotentiale ud over den simple reguleringsstrategi medfører dette at luftmængden også reduceres i brugstiden. Dette vil medføre en diskussion om hvorvidt denne reguleringsform medfører en forringelse af indeklimaet og om denne forringelse er acceptabel. Der foreligger ikke tilstrækkelig viden om indeklimaets indflydelse på sundheden til, at vi kan anbefale at luftskiftet

reduceres betydeligt i brugstiden. Flere vurderinger i laboratoriet og huse er nødvendige for at den avancerede reguleringsstrategi kan anbefales.

10 Konklusion

I dette projekt er undersøgt muligheden for behovsstyring af luftskiftet i en-familieboliger ved praktisk afprøvning af to forskellige strategier med udgangspunkt i helt basale krav:

- Der må ved normal (og korrekt) brug af boligen ikke kunne opstå fugttekniske problemer forårsaget af behovsstyringen
- Det atmosfæriske indeklima må ikke forringes ved behovsstyringen

De undersøgte strategier kan beskrives som en relativ simpel og billig strategi, og en relativ avanceret og dyr strategi:

1. *Simple regulering:* Luftudskiftningen varierer ensartet for alle rum svarende til et gennemsnitligt luftskifte for hele boligen på enten $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ eller $0,35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. Variationen i luftskifte styres af centrale ventilationsaggregatsensorer (relativ luftfugtighed, temperatur og CO_2) placeret i udsugningsluften og udeluften. Reguleringen foretages på baggrund af CO_2 -koncentration og absolut fugtighed i både indblæsnings- og udsugningsluft. Registrering af en fast forskel i CO_2 -koncentrationen mellem indblæsnings- og udsugningsluft aktiverer det høje trin. Når forskellen i CO_2 -koncentrationen igen er under grænseværdien køres ned på det lave trin. Som supplement til CO_2 -styringen måles forskellen i absolut fugtighed mellem indblæsnings- og udsugningsluft, for at sikre at ventilationen forbliver på det høje trin, såfremt der er en fugtproduktion når ingen er hjemme (evt. pga. tørring af tøj).
2. *Avanceret regulering:* Luftskiftningen varierer dynamisk for alle opholdsrum svarende til et gennemsnitligt luftskifte for hele boligen i intervallet $0,1 \text{ l/(s m}^2\text{)}$ eller $0,35 \text{ l/(s m}^2\text{)}$. Variationen i luftskifte for de enkelte opholdsrum styres af CO_2 -sensorer placeret i hvert opholdsrum og reguleringsspjæld i indblæsningssystemets tilslutningskanaler. Der er yderligere placeret sensorer for relativ luftfugtighed i de fugtbelastede rum som sikrer et gennemsnitlige luftskifte for hele boligen forceret til 0,5 gange pr. time hvis der er høj relativ fugtighed i et af de fugtbelastede rum.

Resultaterne hvor boligen ventileres med konstant luftskifte som krævet i Bygningsreglementet viser at CO_2 -koncentrationen og luftfugtigheden i boligen i hovedtræk holdes indenfor anbefalede grænser. I soveværelset registreres om natten dog ofte CO_2 -koncentration over 1000 ppm, hvilket ofte anvendes som grænsen for acceptabel luftkvalitet. Dette skyldes høj belastning fra to sovende voksne og ofte også et barn. Desuden ses tydeligt, at boligen ikke bruges i dagtimerne på hverdage, hvor CO_2 -koncentrationen i løbet af dagtimerne falder til nær udeluftens koncentration.

For den simple regulering er udført målinger for forskellige grænseværdier for forskel i CO_2 -koncentration og forskel i absolut fugtighed. Den bedste funktion for den aktuelle bolig blev opnået med grænseværdier på 150 ppm for forskellen i CO_2 -koncentration og 2 g/kg for absolut fugtighed. I dette tilfælde kørte ventilationen i 37 % af tiden på det lave trin. Der observeredes stadig for høje CO_2 -koncentrationer i soveværelset, hvilket skyldes at den simple regulering ikke gav mulighed for forcering af luftmængden ud over kravet i Bygningsreglementet. Vurderet på CO_2 -koncentrationen og luftfugtigheden konkluderes at den simple regulering ikke giver anledning til væsentlige forringelser af det atmosfæriske indeklima.

For den avancerede regulering er udført målinger med forskellige setpunkter for CO₂-koncentrationen i opholdsrummene og en svag forcering af luftmængden til soveværelset er mulig. Setpunkter på 500 ppm og 800 ppm er undersøgt. Med setpunkt på 500 ppm kører den avancerede regulering meget lig den simple regulering, da CO₂-koncentrationen pga. opblanding af luften i boligen i alle boligens opholdsrum hurtigt overstiger 500 ppm når der er personer i boligen, hvilket medfører at alle spjæld åbner. Setpunktet for CO₂-koncentrationen i opholdsrummene på 800 ppm svarer til et ønske om en luftkvalitet lidt bedre end indeklimaklasse II, som anbefales som normalt niveau ifølge EN15251 (DS, 2007). Der er dog ingen garanti for at setpunktet kan holdes, da luftskiftet med undtagelse af soveværelset ikke kan forceres over det krævede luftskifte i bygningsreglementet. Med setpunkt på 800 ppm viser resultaterne at med undtagelse af spjældene til stuen og soveværelser så forbliver spjældene til de øvrige opholdsrum lukkede næsten hele tiden, hvilket medfører et væsentligt lavere samlet luftskifte i boligen end ved den simple regulering. Pga. udfald i volumenstrømsmålingerne er det dog ikke til at sige hvor meget det reduceres. Dette medfører en forøgelse af CO₂-koncentrationen i visse opholdsrum i forhold til den simple regulering, men CO₂-koncentrationen holder sig under de ønskede 800 ppm. I børneværelserne ses at spjældene stort set altid er lukkede men åbner ganske kort i løbet af natten for at holde CO₂-koncentrationen under 800 ppm. Børneværelserne oplever således en lavere luftkvalitet end det var tilfældet med den konstante ventilation og den simple regulering. Luftkvaliteten i børneværelserne overholder dog kravene til indeklimaklasse II. Luftkvaliteten kan forbedres ved at sænke setpunktet for CO₂-koncentrationen, men det medfører at systemet opfører sig mere og mere som den simple regulering, som er væsentlig mere simpel og billig at implementere.

Den avancerede regulering giver mulighed for større energibesparelser end den simple regulering, da det samlede luftskifte i boligen reduceres. Den valgte reguleringsstrategi sikrer dog ikke at dette besparelspotentiale opnås mht. elforbruget, da den implementerede regulering holder et for højt tryk i kanalsystemet. Det er nødvendigt at udvikle reguleringsalgoritmen videre for at opnå det fulde besparelspotentiale.

Selvom de to forskellige strategier er implementeret og afprøvet i boligen over længere tid, kan kun den simple regulering anbefales på nuværende tidspunkt. Den simple regulering sikrer at luftkvaliteten i boligen er stort set den samme som ved en konstant ventilation. Desuden kræver den simple regulering "kun" to CO₂ sensorer, to relativ fugtighed sensorer og to temperatur sensorer, som dog alle skal checkes fx i forbindelse med filterskift. Styringen i lidt modificeret form anvendes i dag i møderum, kontorlokaler, institutioner etc.

Den avancerede styring rummer en del fordele sammenlignet med den simple regulering blandt andet muligheden for bedre fordeling af luften hvor der er brug for den. For at opnå et besparelspotentiale ud over den simple reguleringsstrategi medfører dette at luftmængden også reduceres i brugstiden. Dette vil medføre en diskussion om hvorvidt denne reguleringsform medfører en forringelse af indeklimaet og om denne forringelse er acceptabel. Der foreligger ikke tilstrækkelig viden om indeklimaets indflydelse på sundheden til, at vi kan anbefale at luftskiftet reduceres betydeligt i brugstiden. Flere vurderinger i laboratoriet og huse er nødvendige for at den avancerede reguleringsstrategi kan anbefales.

11 Litteratur

Aggerholm, S. og Grau, K. (2008) Bygningers energibehov – PC-program og beregningsvejledning. SBI-anvisning 213. Statens Byggeforskningsinstitut.

Bergsøe, N. C. (2000) Vurdering af ventilationsbehov. SBI-meddelelse 130, Statens Byggeforskningsinstitut.

Bergsøe, N. C. og Afshari A. (2008) Fugtstyret boligventilation - Målinger og evaluering. SBI 2008:08, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Boverket (2008) Regelsamling för byggande, BBR 2008. Boverket, Karlskrona.

DS (2007) DS/EN 15251 Criteria for the Indoor Environment including thermal, indoor air quality, light and noise, Dansk Standard.

EBST (2008) Bygningsreglement, Erhvervs- og Byggestyrelsen. <http://www.br08.dk> .

IES (2008a) ApacheSim User Guide. Virtual Environment 5.9. Integrated Environmental Solutions Ltd., Glasgow, UK.

IES (2008b). MacroFlo User Guide. Virtual Environment 5.9. Integrated Environmental Solutions Ltd., Glasgow, UK.

IES (2008c). ApacheHVAC User Guide. Virtual Environment 5.9. Integrated Environmental Solutions Ltd., Glasgow, UK.

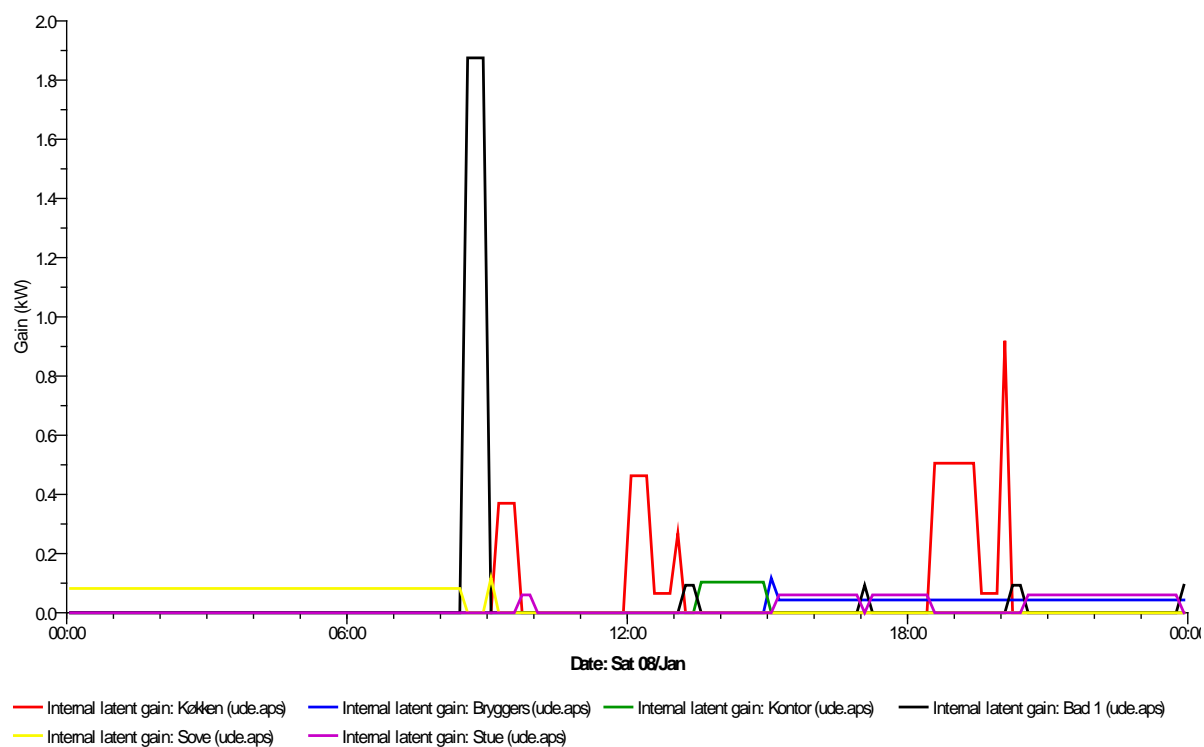
IES (2009). Virtual Environment. Integrated Environmental Solutions Ltd., Glasgow, UK. <http://www.iesve.com>

Rose, J. (2007) Udvikling af typehuse i lavenergiklasse 1, Rapport SR 07-01, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.

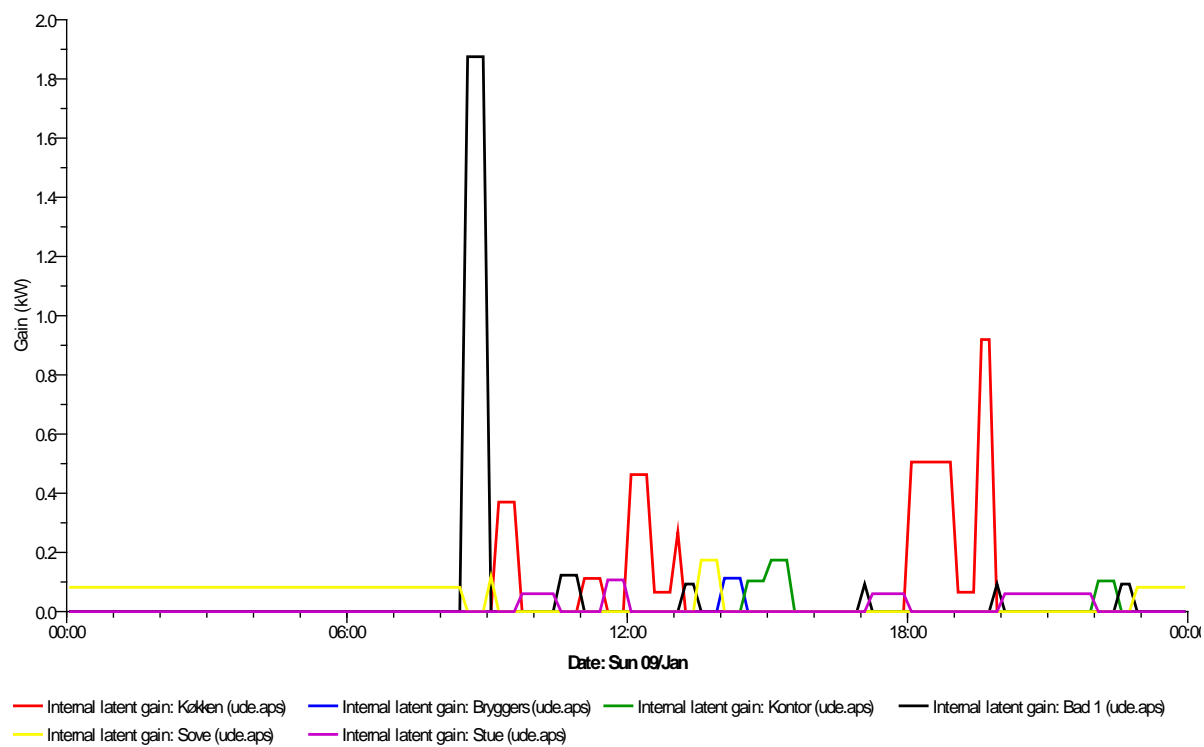
SBI (2002) BSim: Computer program for calculating and analyzing indoor climate conditions, energy demands and energy consumption in buildings, Danish Building Research Institute. <http://www.bsim.dk>.

Taylor, S. T. (2007) Increasing efficiency with VAV system static pressure setpoint reset. ASHRAE Journal, Vol. 49, Issue 6, pp. 24-32.

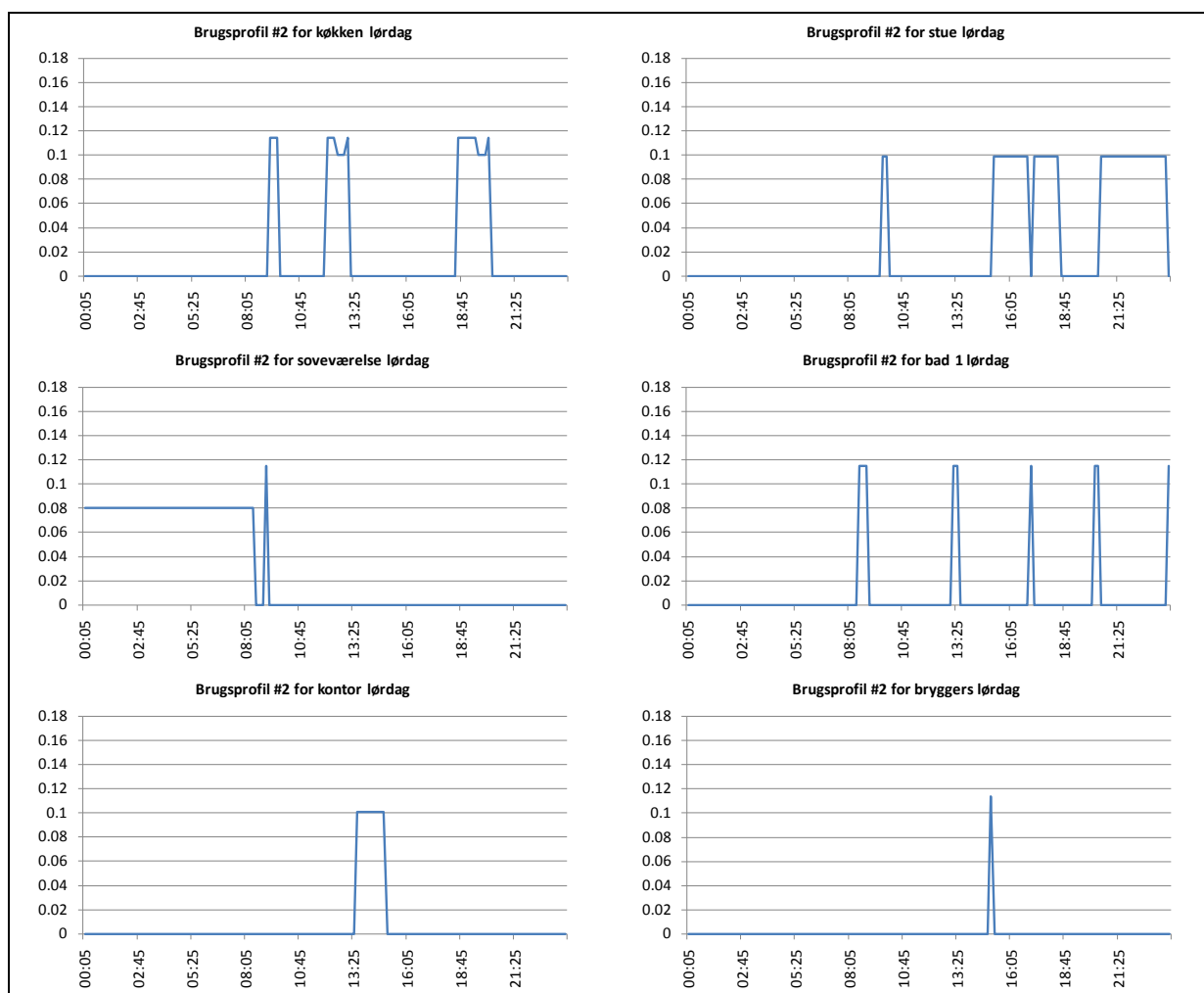
Bilag 1. Weekendbrugsmønstre anvendt ved simulering i IESVE



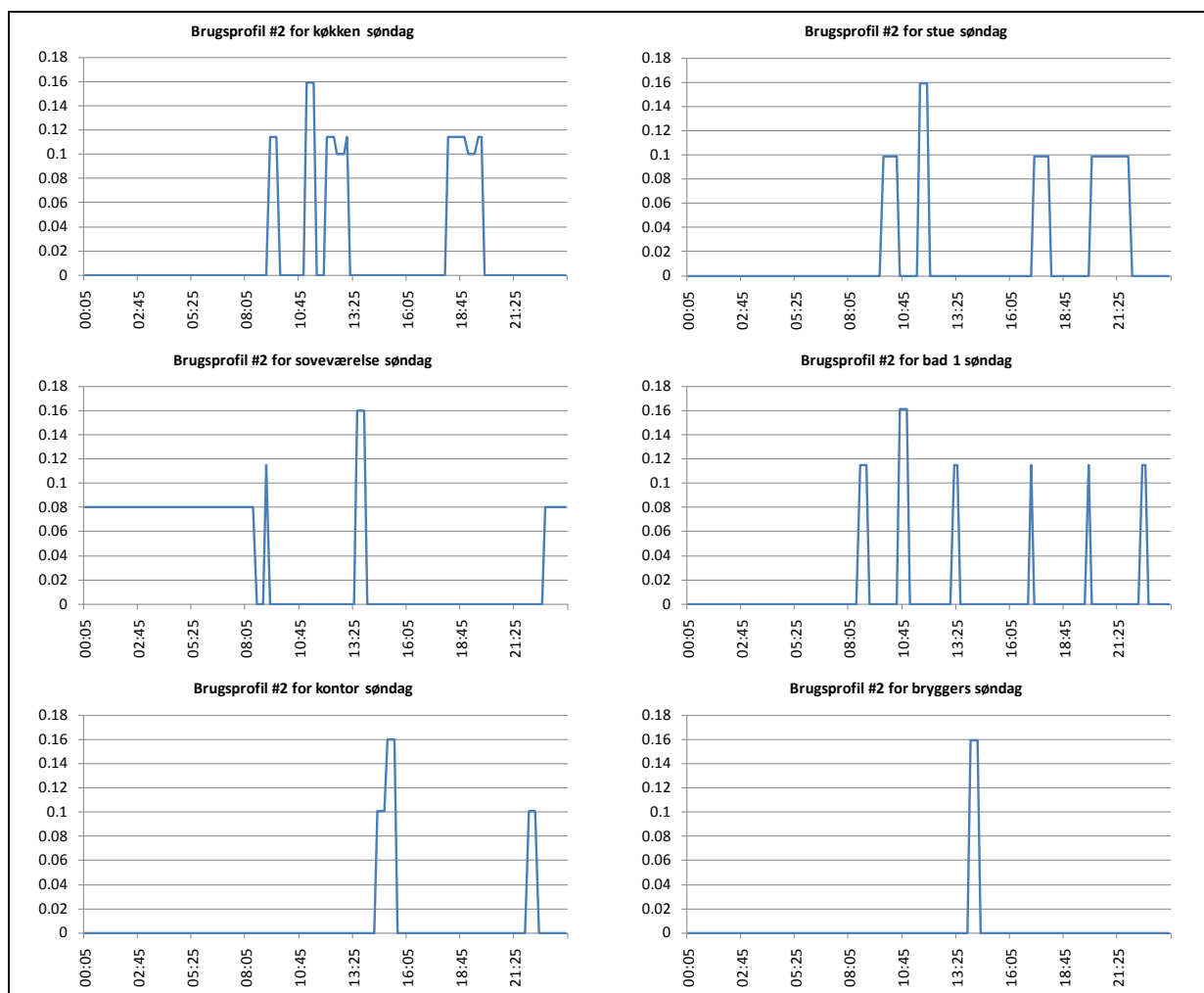
Figur 56. Den latente varmebelastning på lørdage i de enkelte rum når huset bebos af én person.



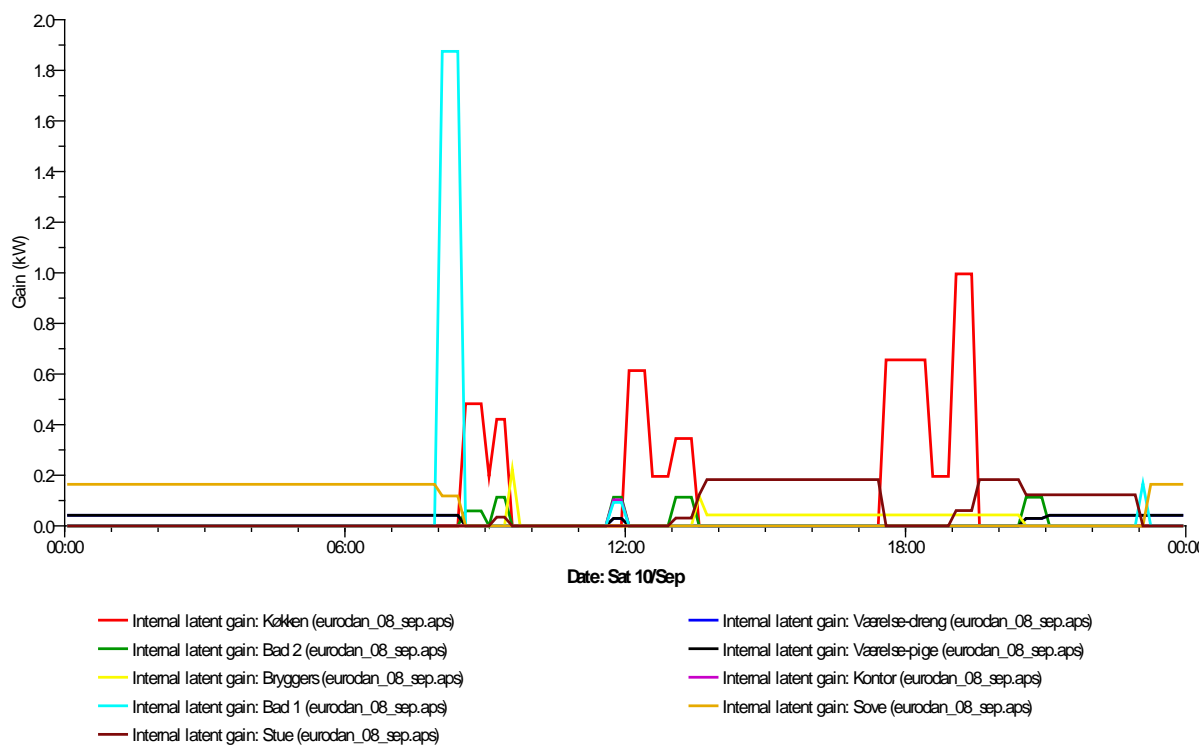
Figur 57. Den latente varmebelastning på søndage i de enkelte rum når huset bebos af én person.



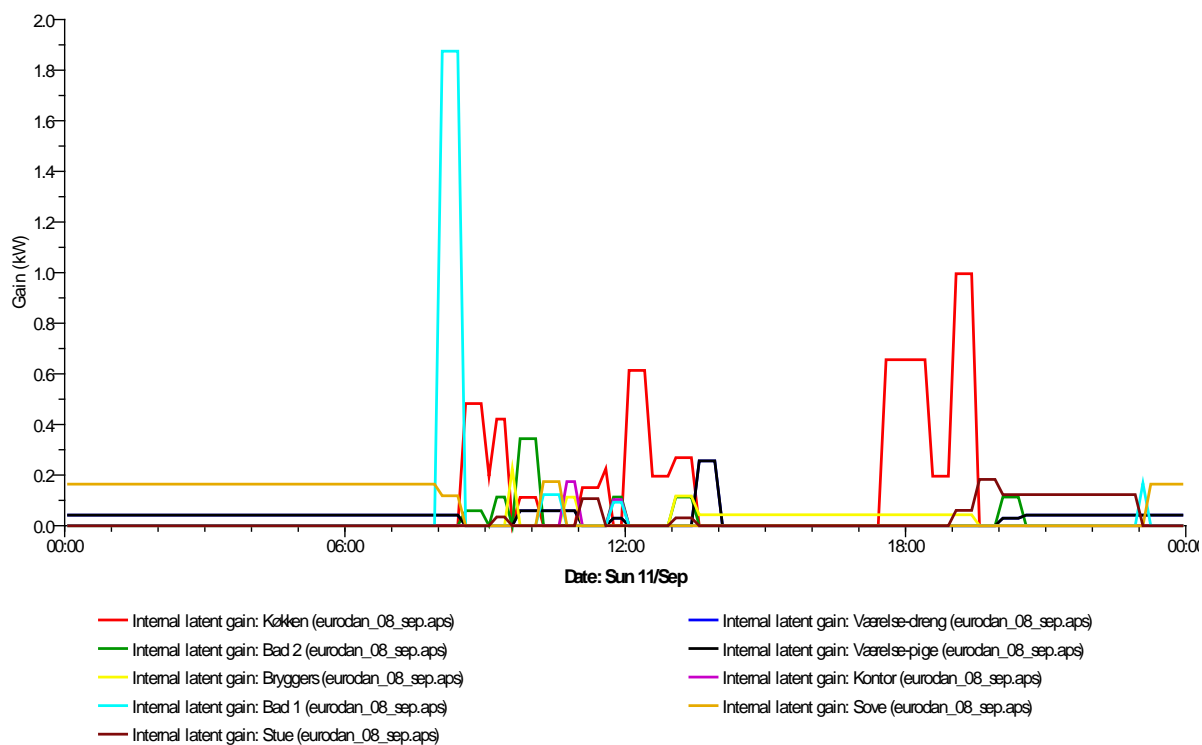
Figur 58. Personlasten i kW på lørdage i de enkelte rum når huset bebos af én person.



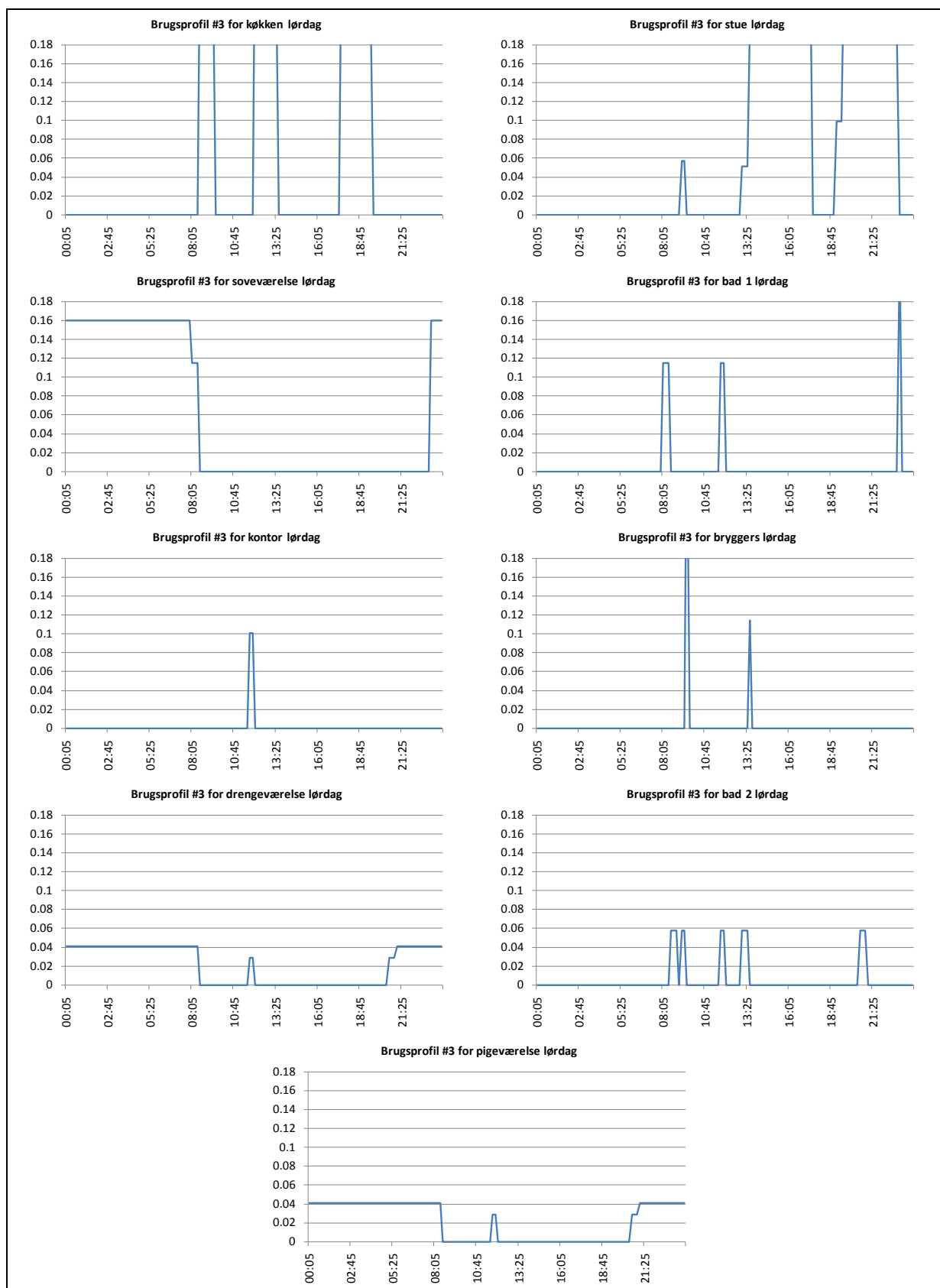
Figur 59. Personlasten i kW på søndage i de enkelte rum når huset bebos af én person.



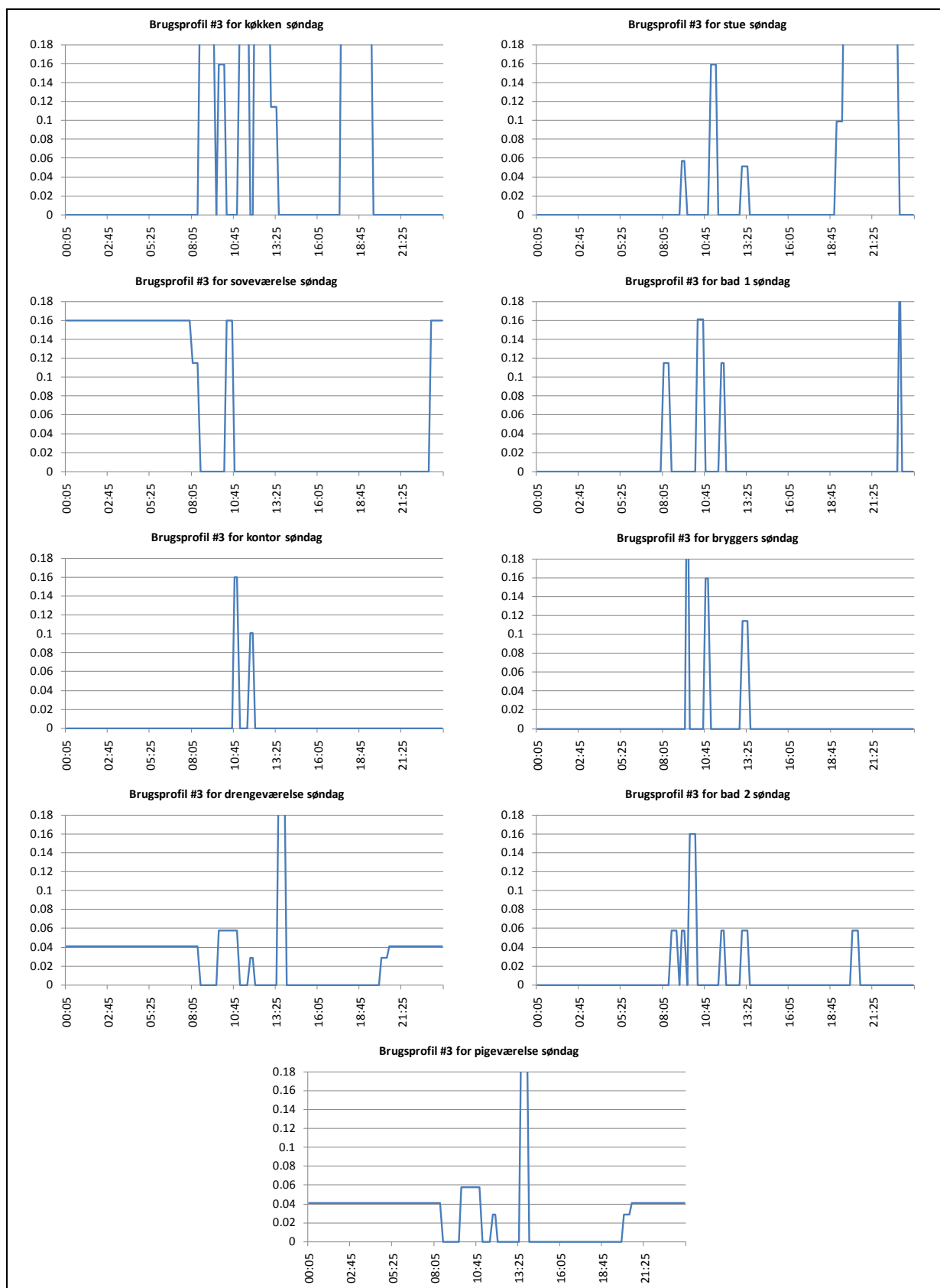
Figur 60. Den latente varmebelastning på lørdage i de enkelte rum når huset bebos af to voksne og to børn.



Figur 61. Den latente varmebelastning på søndage i de enkelte rum når huset bebos af to voksne og to børn.



Figur 62. Personlasten i kW på lørdage i de enkelte rum når huset bebos af to voksne og to børn.



Figur 63. Personlasten i kW på søndage i de enkelte rum når huset bebos af to voksne og to børn.

Bilag 2. Pseudokode for reguleringsstrategi med regulering af setpunkt for konstanttrykregulering

I det følgende er angivet en pseudokode for en reguleringsstrategi som anvender trim and respond som beskrevet i Taylor (2007). Strategien er ikke implementeret i projektet og er derfor kun angivet som oplæg til en ændret reguleringsstrategi. Alle værdier nævnet i koden er således tænkte.

TASK

Task 1

```
<gennemløb alle CO2 sensorer hvert 2 minut>
    spjæld = 25% + 75%*(CO2-750)/100
    If CO2 < 750 then spjæld 25% endif
    If CO2 > 850 then spjæld 100% endif
endTask1
```

Task 1a

```
<gennemløb alle CO2 sensorer hvert 2 minut>
    If alle CO2<450 then spjæld = 100% and kanaltryk =ZZ
    KOMMENTAR: ZZ bør sættes så vi får den ønskede mindste ventilation
endTask 1a
```

Task 2

```
<gennemløb alle spjældindstillinger hvert 2 minut>
    If max[spjæld] < 90% then kanaltryk = kanaltryk – 5 Pa endif
    If max[spjæld] > 95% then kanaltryk = kanaltryk + 5 Pa endif
    If max[kanaltryk] > XX pa then kanaltryk = XX endif
    If min[kanaltryk] < YY then kanaltryk = YY endif
    KOMMENTAR: YY bør sættes så vi sikrer mindste ventilation
endTask2
```

Task 3

```
<gennemløb alle RF sensorer hvert 1 minut>
    If deltaX_i > 2 gram/kg then alle spjæld 100% and kanaltryk = XX endif
    KOMMENTAR: XX sættes så vi får ønsket udsugning)
endTask3
```

Task 4

```
<gennemløb q_ind og q_ud hvert minut>
    if (q_ud – q_ind) < -25 m3/h then kanaltryk_ud = kanaltryk_ud + 5Pa endif
    if (q_ud – q_ind) > 25 m3/h then kanaltryk_ud = kanaltryk_ud – 5 Pa endif
endTask4
endTASK
```

Muligheden for behovsstyret ventilation i enfamiliehuse er undersøgt. To strategier er afprøvet i praksis: En relativ simpel og billig strategi og en relativ avanceret og dyr strategi. Den simple strategi regulerer luftskiftet ensartet for alle rum mellem et lavt eller højt niveau. Den avancerede strategi regulerer luftmængden individuelt i de enkelte rum. De to strategier er implementeret og afprøvet i et enfamiliehus over længere tid.

På nuværende tidspunkt kan kun den simple strategi anbefales. Den simple strategi sikrer, at luftkvaliteten i boligen er stort set den samme som ved en konstant ventilation efter gældende krav. Desuden kræver den simple regulering kun få sensorer og er således væsentlig billigere og enklere at implementere end den avancerede strategi.